

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAFAEL BUBACK TEIXEIRA

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E
REPOSICIONAMENTO DE CONTÊINERES VAZIOS
NO TRANSPORTE MARÍTIMO**

PORTO ALEGRE

2017

RAFAEL BUBACK TEIXEIRA

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E
REPOSICIONAMENTO DE CONTÊINERES VAZIOS
NO TRANSPORTE MARÍTIMO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Transportes.

Orientador: Michel José Anzanello, PhD.

PORTO ALEGRE

2017

RAFAEL BUBACK TEIXEIRA

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE
CONTÊINERES VAZIOS NO TRANSPORTE MARÍTIMO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Michel José Anzanello, PhD.
Orientador PPGEQ/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD.
Coordenador PPGEQ/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Cláudio Barbieiri da Cunha, Dr. (PPGET/ USP)

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD. (PPGEQ/UFRGS)

Prof. Marcelo Farenzena, Dr. (PPGEQ/UFRGS)

CIP - Catalogação na Publicação

Teixeira, Rafael Buback
SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E
REPOSICIONAMENTO DE CONTÊINERES VAZIOS NO TRANSPORTE
MARÍTIMO / Rafael Buback Teixeira. -- 2017.
107 f.
Orientador: Michel José Anzanello.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, BR-
RS, 2017.

1. Contêiner. 2. Reposicionamento. 3.
Roteirização. 4. Rede espaço-tempo. I. Anzanello,
Michel José, orient. II. Título.

Dedico esta tese em especial à minha amada esposa, Camila, e aos meus queridos pais, Luiz e Odete.

AGRADECIMENTOS

À Deus, minha maior fonte de força e sabedoria, ao qual confiou diversos dons para que eu pudesse colocar em prática as obras do seu reino. Ser docente é parte integrante desse projeto no intuito de formar mentes jovens para um futuro brilhante calcados na moralidade e no crescimento positivo da sociedade com o exercício da profissão.

À Vida, maravilha concedida por Deus a todos que sabem viver e conhecem o verdadeiro pulsar da vida eterna que jamais se acaba.

Aos meus queridos pais, Luiz Roberto e Odete, que são a minha razão de viver. Por intermédio de Deus e pelo projeto de vida dos dois, recebi um dom mais precioso do universo: A Vida. Agradeço todo o apoio e oração. Por isso tudo já sou infinitamente grato.

Aos meus irmãos, Bruno e Marcela, que sempre me apoiaram, junto com meus pais, nas alegrias e também nos momentos difíceis.

À minha esposa, Camila, pelo inestimável apoio familiar, paciência e compreensão revelada ao longo desses anos. Sempre me deu todo apoio nos momentos difíceis e compartilhou comigo as alegrias dos bons momentos. Uma pessoa maravilhosa que amo muito.

À Maria Helena, minha querida sogra, que, com paciência e cuidado de mãe, esteve presente principalmente com suas orações.

Aos meus cunhados, Cleyton, Mirela, Nelson e Carla, na certeza de que sempre estiveram na torcida pelo meu sucesso.

À Luiz Henrique, um grande amigo que me ajudou na reta final me dando forças, conselhos e pensamentos positivos para melhor alcançar o meu objetivo.

Ao professor e parceiro Cláudio, pelo grande apoio dado na trajetória profissional e acadêmica desde o mestrado até agora no doutorado. Sua colaboração foi de extrema importância para meu crescimento, sendo imensurável o grande valor que obtive.

Ao orientador Michel, pela confiança e os ensinamentos durante toda essa minha caminhada no doutorado, principalmente pela paciência nos momentos difíceis.

Ao IFES, por terem idealizado o DINTER, abrindo portas a novos pesquisadores dentro do instituto e, principalmente, à sociedade.

Há muitos outros contributos de natureza diversas que também não foram evidenciados nessa página, sinceramente agradeço, profundamente, e dedico o resultado do trabalho.

RESUMO

O transporte de contêineres é um serviço essencial no transporte global, apresentando uma rápida taxa de crescimento na sua utilização quando comparado com outros modos de transporte convencionais. Nesse contexto, o problema de roteirização de cargas de contêineres e o problema de reposicionamento de contêineres vazios são altamente correlacionados, sugerindo a necessidade de uma formulação conjunta adaptada para otimizar o sistema. Esta tese apresenta uma nova sistemática para seleção de cargas, alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios em apoio às decisões operacionais no gerenciamento do transporte de contêineres por companhia de transporte regular em modal marítimo. O modelo proposto possibilita selecionar cargas e decidir por alternativas de rotas, além de reposicionar os contêineres vazios. O modelo integrado visa maximizar a margem de contribuição no transporte de contêineres para uma demanda fixa de múltiplos tipos de contêineres por uma rede de transporte em um horizonte de tempo particular, como uma rede espaço-tempo em um modelo de rede de fluxo máximo com restrições adicionais de alocação de requisições de cargas em caminhos nas rotas conhecidas. Foram criadas instâncias consistentes com a realidade considerando diferentes demandas fixas e estoques de contêineres. Os resultados mostram a flexibilidade e aplicabilidade do modelo para solucionar este problema de decisão complexo.

Palavras-chave: contêiner, reposicionamento, roteirização, rede espaço-tempo

ABSTRACT

Container shipping is an essential service in global trade, presenting a fast-growing rate of utilization when compared to other conventional shipping modes. In this context, the cargo container routing and empty repositioning container problems considering maritime liner companies are highly related, suggesting the need for a joint formulation tailored to optimize the system. This Thesis proposes a novel approach for cargoes acceptance in routes and empty container repositioning in support to decisions in the container transporting management by liner shipping companies in maritime transport modal. The proposed model decides by cargo acceptance or rejection to transport in known routes, in addition to reposition the empty containers. The integrated model maximises the contribution margin for fixed demand of multiples types of containers by a transport network in a particular season as a space-time network based on a max-flow network model with additional constraints of cargoes requisitions allocation in fixed route paths. We defined instances consistent with reality considering different fixed demands and inventory of containers. The results show the flexibility and applicability of this model to solve this complex decision problem.

Keywords: container, repositioning, routing, space-time network

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Quadros.....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Siglas	v
1 INTRODUÇÃO	6
1.1 TEMA	8
1.2 OBJETIVOS	8
1.3 JUSTIFICATIVA.....	8
1.4 DELINEAMENTO DO ESTUDO.....	10
1.4.1 Método de Pesquisa.....	10
1.4.2 Método de Trabalho	10
1.5 DELIMITAÇÕES	11
1.6 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO	11
1.7 ESTRUTURA DA TESE.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 TRANSPORTE DE CONTÊINERES EM MODAL MARÍTIMO.....	13
2.2 MODELOS DE REDE.....	16
2.2.1 Modelo de transporte.....	16
2.2.2 Modelo de Transbordo	17
2.2.3 Rede espaço-tempo	18
2.3 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE VAZIOS.....	20
2.3.1 Principais entidades do problema.....	23
2.3.2 Principais atividades do problema.....	24
2.4 ABORDAGENS DA LITERATURA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE VAZIOS	26
3 MODELO DE ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE CONTÊINERES VAZIOS NO TRANSPORTE MARÍTIMO PARA NÍVEL OPERACIONAL DE DECISÃO.....	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	33
3.2 MODELAGEM PROPOSTA	39
3.2.1 Premissas de modelagem	40
3.3 ELEMENTOS E NOTAÇÕES DO MODELO PROPOSTO	42

3.4	REPRESENTAÇÃO DA REDE	45
3.4.1	Nós de origem e sorvedouros globais	45
3.4.2	Atividades de Estoque nos Portos	46
3.4.3	Atividades de Transporte Marítimo	47
3.4.4	Atividades de Embarque e Desembarque.....	47
3.4.5	Atividades de Transbordo	48
3.4.6	Caminhos de rota para transporte de cargas	48
3.5	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	50
3.6	MÉTODO DE EXECUÇÃO E VALIDAÇÃO.....	54
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO.....	58
4.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	58
4.2	MODELO DE DADOS.....	58
4.2.1	Modelo de dados de entrada.....	58
4.2.2	Modelo de dados da rede espaço-tempo.....	60
4.3	INTERFACES	61
4.4	PROCESSAMENTOS	65
5	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	66
5.1	CASO 1: UM PROBLEMA PEQUENO	66
5.2	CASO 2: UM PROBLEMA GRANDE	69
5.2.1	Desenho do Experimento	69
5.2.2	Análise dos conjuntos de instâncias	75
5.2.3	Detalhamento de uma instância.....	78
5.2.4	Desempenho computacional do modelo.....	85
6	CONCLUSÕES	87
6.1	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	APÊNDICES.....	96
	Apêndice A – Modelo matemático completo	Erro! Indicador não definido.
	Apêndice B - Paradas dos navios nos portos para embarque e desembarque	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de planejamento para companhias no transporte de contêineres.....	15
Figura 2 – Um problema de transbordo.....	18
Figura 3 – Exemplo de uma rede espaço-tempo para transporte de contêineres.	19
Figura 4 – Ciclo de Contêineres Vazios e Cheios	38
Figura 5 – Nós e arcos de estoque com nós de fonte e sorvedouro globais.....	46
Figura 6 – Nós e arcos marítimos na rede espaço-tempo	47
Figura 7 – Arcos de embarque e de desembarque na rede espaço-tempo.....	48
Figura 8 – Arcos de transbordo na rede espaço-tempo.....	48
Figura 9 – Exemplos de caminhos de rota na rede espaço-tempo	50
Figura 10 – Método de otimização proposto	55
Figura 11 – Relação dos principais componentes do SSD	58
Figura 12 – Visão macro das entidades de entrada de dados e suas relações	59
Figura 13 – Modelo de dados das entidades de dados de entrada	60
Figura 14 - Visão macro das entidades da estrutura da rede e suas relações	61
Figura 15 – Modelo de dados das entidades para estrutura da rede espaço-tempo.....	61
Figura 16 – Tela inicial do Sistema de Apoio à Decisão.....	62
Figura 17 – Tela de cadastros básicos: tipos de contêineres, portos e navios.....	63
Figura 18 – Tela de cadastro de estoque inicial para cada porto por tipo de contêiner	63
Figura 19 – Tela de cadastro da capacidade de contêineres por tipo nos navios	63
Figura 20 – Tela de cadastro de paradas dos navios nos portos para embarque e desembarque	64
Figura 21 – Tela para cadastro de cargas a serem transportadas.	64
Figura 22 – Tela de caminhos de rota conforme cadastro de paradas dos navios.	64
Figura 23 – Rede espaço-tempo para o caso 1 de exemplo	66

Figura 24 – Visão geográfica do sistema de transporte marítimo e estrutura topológica dos serviços.....	70
Figura 25 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço A.....	71
Figura 26 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço B.....	71
Figura 27 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço C.....	71
Figura 28 – Pico de utilização de capacidade em TEUs.....	76
Figura 29 – Pico de utilização de capacidade em peso.....	76
Figura 30 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço A.....	80
Figura 31 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço B.....	80
Figura 32 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço C.....	81
Figura 33 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço A.....	81
Figura 34 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço B.....	81
Figura 35 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço C.....	82
Figura 36 – Média e pico de utilização da capacidade em TEUs dos navios.....	82
Figura 37 – Média e pico de utilização da capacidade em peso dos navios.....	83
Figura 38 – Estoque de contêineres nos portos por período.....	84
Figura 39 – Razão de exportação/importação de contêineres em cada porto.....	84
Figura 40 – Decaimento do GAP durante as interações de nós MIP até o critério de parada.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Notações para modelo de transporte.....	16
Quadro 2 – Conjuntos de elementos principais do modelo	42
Quadro 3 – Conjunto e subconjuntos de nós da rede espaço-tempo.....	43
Quadro 4 – Conjunto e subconjuntos de arcos da rede espaço-tempo	43
Quadro 5 – Atributos dos nós da rede espaço-tempo	43
Quadro 6 – Atributos dos arcos da rede espaço-tempo	43
Quadro 7 – Parâmetros para os tipos de contêineres	44
Quadro 8 – Parâmetros para cargas	44
Quadro 9 – Parâmetros para caminhos de rotas associados a cada carga.....	44
Quadro 10 – Parâmetros para caminhos de rota	44
Quadro 11 – Parâmetros para auxílio na geração das instâncias	45
Quadro 12 – Variáveis de decisão do modelo matemático	45
Quadro 13 – Primeira e última parada de cada navio dentro do horizonte de planejamento.....	70
Quadro 14 – Parâmetros alterados após a função tune no pacote Gurobi.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caminhos de rota para o caso de exemplo	68
Tabela 2 – Definições das cargas para o caso de exemplo	68
Tabela 3 – Margem de contribuição unitária para cada combinação de carga e caminho de rota	69
Tabela 4 – Capacidade em TEUs e em peso dos navios.....	71
Tabela 5 – Custos de embarque e desembarque de contêineres para cada porto	72
Tabela 6 – Quantidade de contêineres em transporte nos navios para cada destino por tipo de contêiner	74
Tabela 7 – Peso bruto da carga em transporte nos navios para cada próximo destino	74
Tabela 8 – Sensibilidade para a variação da demanda de carga	75
Tabela 9 – Sensibilidade para a variação da demanda de carga	75
Tabela 10 – Reposicionamento de contêineres por demanda/suprimentos em TEUs.....	77
Tabela 11 – Reposicionamento de contêineres por demanda de carga.....	77
Tabela 12 – Razão entre estoque final e inicial por porto	77
Tabela 13 – Custos e margem de contribuição líquida para demanda de cargas e contêineres.	78
Tabela 14 – Quantidade de cargas rejeitadas de acordo com as regiões de origem e destino	79
Tabela 15 – Quantidade de cargas realocadas em rotas alternativas por regiões de origem e de destino.....	80
Tabela 16 – Composição da margem de contribuição líquida (função objetivo).	85

LISTA DE SIGLAS

AX	Auxiliar
B&C	<i>Branch and Cut</i>
CAPER	<i>Cargo Allocation Problem With Empty Repositioning</i>
CPU	Unidade Central de Processamento
DC	<i>Dry cargo</i> (Carga seca)
FFA	<i>Forward Freight Agreement</i>
FOR	Fortaleza
ITJ	Itajaí
IV	Inventário
LD	<i>Loading</i> (Embarque)
LR	<i>Location Routing Problem</i>
MAO	Manaus
MIP	<i>Mixed-Integer Programming</i> (Programação Inteira-mista)
MT	Marítimo
NSG	Nó de Origem Global de Contêineres
NTG	Nó de Sorvedouro Global de Contêineres
PNG	Paranaguá
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
RIG	Rio Grande
RIO	Rio de Janeiro
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SAS	<i>State-Augmented Shipping</i>
SPB	Sepetiba
SSA	Salvador
SSZ	Santos
SUA	Suape
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i> (Unidade equivalente de 20 pés)
TS	<i>Transshipment</i> (Transbordo)
UD	<i>Unload</i> (Desembarque)

1 INTRODUÇÃO

A globalização torna mais complexa a operação nas cadeias de suprimento e eleva os desafios no planejamento para os seus diferentes elos. Esse efeito é intensificado pelo contínuo crescimento do comércio interacional em virtude, principalmente, das oportunidades advindas com a globalização (Unctad, 2016).

Os contêineres surgiram na década de 1960 como uma alternativa promissora no transporte de carga, principalmente para usos em via marítima. De acordo com UNCTAD (2016), o comércio de contêineres tem crescido 8,2% anualmente, em média, de 1990 a 2010. Em 2009, houve uma queda em tais indicadores, o que pode ser atribuída à crise econômica. Apesar de fatos negativos que reduziram o ritmo de crescimento, em 2010 o transporte de contêineres apresentou resultado recorde em número de movimentações; desde então, o crescimento voltou a ser verificado.

Wilson & Roach (2000) discutiram que, para uma significativa redução dos custos e do aumento do transporte de carga de contêineres por via marítima, as companhias de navegação promoveram economia de escala com o aumento do tamanho dos navios. Nesse contexto, em 2014, os maiores navios de contêineres possuíam capacidade de 14.000 TEUs (*Twenty-foot Equivalent Unit*) (Carlo et al., 2014). Em 2015, novos navios mais eficientes e de maior capacidade passaram a ser utilizados, permitindo capacidades superiores a 20.000 TEUs, com maior eficiência energética que os concorrentes (HALFF, 2017).

Nessa modalidade de transporte, muitas oportunidades surgem para a proposição e a aplicação de novas abordagens quanto ao desenho de terminais de contêineres, equipamentos de movimentação e de aplicações de pesquisa operacional, com o intuito de ajustar continuamente a capacidade frente à crescente demanda. É enfatizado que o gerenciamento no transporte de contêineres é um problema relevante, por conta de seus altos custos e da complexidade das suas operações (DEJAX & CRAINIC, 1987; WILSON & ROACH, 2000). A otimização nessas operações de rotas de serviços operadas por companhias de navegação de contêineres é substancialmente relevante para manter os índices de crescimento no mercado de transporte por esses equipamentos (TRAN & HAASIS, 2015). As operações para a movimentação de contêineres podem ser otimizadas de modo maximizar a rentabilidade das companhias de navegação, reduzindo os custos de manuseio e transporte de contêineres vazios.

Além disso, permite a aceitação de requisições de transporte mais rentáveis em vista à falta de capacidade ao longo dos portos e dos navios na rede de serviços. Essa rede é caracterizada como um sistema regular de rotas de serviços com frequências bem definidas (BROUER, PISINGER & SPOORENDONK, 2011).

Existe uma correlação próxima entre roteirização de contêineres cheios e no reposicionamento de contêineres vazios por companhias de navegação. Primeiro, as cargas a serem aceitas diretamente impactam no balanceamento entre o suprimento e a demanda de contêineres vazios nos portos, uma vez que os desequilíbrios direcionais resultados dos fluxos de frete podem levar alguns portos a acumular contêineres vazios desnecessários, enquanto outros portos podem enfrentar escassez. De tal forma, em um cenário em que a demanda pode ultrapassar a capacidade disponível, é permitido escolher requisições de transporte mais lucrativas para serem transportadas, melhorando o custo de oportunidade.

Teixeira & Cunha (2012) trabalharam com decisões integradas de seleção de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios baseadas no problema abordado por Cuoco (2008), que trata da seleção de cargas e do reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo por meio de um heurística construtiva. Teixeira & Cunha (2012) propuseram um modelo com abordagem de fluxo de rede multiproduto em uma rede espaço-tempo, baseado no problema proposto por Zambuzi & Cunha (2010), cujo modelo é uma otimização linear para o reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo. Os resultados foram satisfatórios para problemas de grande porte no que diz respeito às decisões integradas e em tempos computacionais reduzidos (TEIXEIRA & CUNHA, 2012). O desempenho observado foi possível em virtude da utilização de uma abordagem apoiada em fluxo em rede que permite rapidez na resolução de problemas de otimização misto-inteira, bem como da metodologia adotada que, em conjunto com um sistema de apoio à decisão (SAD), permite a aplicação deste modelo para problemas reais por decisores com pouca experiência em modelagem na área de pesquisa operacional.

Não foram encontrados na literatura outros estudos de transporte de contêineres que considerem decisões integradas, à nível operacional, apoiadas em modelos de otimização para a seleção de cargas e o reposicionamento de contêineres vazios com a utilização de modelo de fluxo em rede, em uma rede espaço-tempo.

1.1 TEMA

O tema da presente tese é a alocação de cargas e o reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo em serviço de cabotagem com vistas a apoiar as decisões operacionais no gerenciamento do transporte de contêineres. Para tanto, faz-se uso de um modelo integrado baseado em fluxo de rede multiproduto em uma rede espaço-tempo que objetiva maximizar a margem de contribuição total nas operações.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é desenvolver um modelo integrado de otimização para a alocação de cargas e o reposicionamento de contêineres vazios ao longo de uma cadeia de múltiplos portos. Os objetivos específicos da tese são:

- (i) Selecionar e adaptar metodologias de modelagem matemática com uso de modelos de rede numa rede espaço-tempo com características binária e múltipla, para fins de alocação de cargas e reposicionamento de vazios;
- (ii) Desenvolver uma sistemática de otimização baseada numa rede espaço-tempo múltipla e de múltiplos fluxos para endereçar o problema de alocação de cargas, de modo a determinar o fluxo de contêineres cheios e vazios;
- (iii) Propor uma nova abordagem de modelagem matemática integrada baseada numa rede espaço-tempo múltipla e de múltiplos fluxos de modo a solucionar o problema de alocação de cargas; e
- (iv) Aplicar a sistemática proposta em instâncias de tamanhos diversos de modo a avaliar a flexibilidade e aplicabilidade do modelo na resolução do problema.

1.3 JUSTIFICATIVA

As operações logísticas no transporte de contêineres, frente ao constante aumento da demanda para o transporte de cargas por modal marítimo em operações de cabotagem, demandam aumento da capacidade nessas operações (o que, em um primeiro momento, sugeriria aumento dos terminais e melhoria tecnológica dos equipamentos de manuseio e de transporte).

No entanto, é percebido que um melhor planejamento prévio à execução do transporte, por meio de sistemáticas de otimização, permite melhor utilização da capacidade sem investimentos de capital em equipamentos e terminais.

Neste segmento, de acordo o relatório anual da UNCTAD (2016), as taxas de frete diminuem de forma constante. O mercado tenta continuamente fortalecer a demanda, com a presença de navios de contêineres cada vez maiores ao longo dos anos. Assim, com um esforço para lidar com níveis baixos de taxas de frete e redução de perdas, as companhias de transporte continuam a considerar medidas para melhorar a eficiência e a otimização de suas operações, como nos anos anteriores.

A integração das decisões no transporte de contêineres em mais de um nível decisório, tal como decisões operacionais integradas às decisões táticas, permite o aumento considerável da margem de contribuição no transporte de contêineres, em vista do maior aproveitamento das oportunidades com a roteirização e a alocação simultânea de carga e de descarga de contêineres cheios e vazios.

Considerando os resultados satisfatórios obtidos por Teixeira & Cunha (2012), com a modelagem em rede numa rede espaço-tempo, é esperado que a consideração de uma abordagem de rede espaço-tempo atrelada às decisões de alocação de cargas permita decisões conjugadas de alocação de carga e de transporte de contêineres cheios e vazios nos navios, em um modelo de otimização integrado e com tempo computacional reduzido. Além disso, a proposta de um sistema de apoio à decisão traz benefícios aos profissionais de planejamento com restritos conhecimentos em pesquisa operacional.

Pelo aspecto acadêmico, o presente trabalho justifica-se por apresentar uma nova sistemática para alocação de carga/descarga de contêineres cheios e vazios apoiada em uma rede espaço-tempo multiproduto considerando decisões integradas de aceitação ou rejeição de cargas. A sistemática proposta apresenta-se promissora frente aos tempos computacionais reduzidos observados por modelagens de rede espaço-tempo para problemas semelhantes.

Ainda no aspecto acadêmico, essa pesquisa é justificada por tratar de um modelo de decisão em nível operacional considerando diversos detalhamentos (tal como distintos tipos de contêineres), o que se diferencia de trabalhos encontrados na literatura, como modelo proposto por BROUER et al. (2011) que tratou do problema de alocação de cargas em rotas e reposicionamento de vazios para apoiar decisões estratégicas no desenho da rede de serviços.

1.4 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Considerando o objetivo proposto, define-se o método de pesquisa e método de trabalho.

1.4.1 Método de Pesquisa

Quanto à natureza, a pesquisa pode ser caracterizada como aplicada, visto que objetiva constituir conhecimento em aplicações práticas em problemas específicos (GIL, 2010). Pretende-se utilizar modelagem matemática para representar as decisões envolvidas em um problema condizente com a realidade, sendo uma abordagem quantitativa (GERHARDT & SILVEIRA, 2009).

A pesquisa se caracteriza como exploratória, em relação aos objetivos, pois envolve levantamento bibliográfico e análise de casos, o que permite a compreensão dos temas trabalhados (GIL, 2010).

Pode-se caracterizar o delineamento da pesquisa desta tese como pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental, uma vez que pretende determinar os parâmetros nas decisões operacionais, ou seja, das variáveis envolvidas (GIL, 2010).

1.4.2 Método de Trabalho

O método de trabalho para a realização da pesquisa está dividido em três etapas, detalhadas na sequência.

A primeira etapa consiste no levantamento bibliográfico acerca do problema de reposicionamento de contêineres vazios e do problema de alocação de cargas, integrados ou não, incluindo técnicas de otimização, algoritmos e heurísticas para a solução do problema, visando construir a fundamentação teórica para a proposição do trabalho.

A segunda etapa baseia-se na caracterização e modelagem do problema, buscando encontrar, de modo eficiente, a solução do problema para instâncias de grande porte no contexto operacional.

A última etapa relata as aplicações do método proposto em um estudo de caso hipotético, para fins de validar a flexibilidade e aplicabilidade do modelo, que seja condizente com a realidade do transporte marítimo.

1.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa considera em seu escopo somente o problema de otimização na alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo. Desta forma, não foram considerados os seguintes tópicos:

- Determinação de frota e roteirização de navios;
- Organização e remanejamento de contêineres nos navios;
- Operações de movimentação de contêineres no pátio portuário;
- Transbordo por modal terrestre entre portos marítimos; e
- Métodos heurísticos para solução de problemas combinatórios.

1.6 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

As contribuições do estudo são divididas em duas frentes, abaixo detalhadas. Outras contribuições adicionais do estudo são enfatizadas nas conclusões.

Decisões em nível operacional no transporte de contêineres

Uma das primeiras contribuições do modelo proposto é a possibilidade de selecionar quais cargas transportar e decidir por quais rotas realizar o transporte dentro de um conjunto de alternativas, e reposicionar os contêineres vazios de modo buscar o equilíbrio na rede de serviços para um planejamento considerando decisões em nível operacional no gerenciamento do transporte de contêineres por companhias de navegação.

A decisão de qual data e por qual navio transportar suas cargas é realizada pelo embarcador. Dentro desse contexto, umas das contribuições importantes do modelo é a definição de caminhos de rota preferenciais para cada carga e a configuração de uma estratégia de oferta com a designação da carga a outros caminhos de rota para evitar a rejeição (em virtude da falta de capacidade nos portos ou navios), incorporando decisões observadas na prática.

Ambos os problemas de alocação de cargas e de reposicionamento de vazios inter-relacionados permitem potencializar decisões de selecionar cargas mais rentáveis frente a disponibilidade de contêineres vazios a serem reposicionados. Isto é possível em virtude da

integração desses problemas em um único modelo matemático, proposto nessa pesquisa. Além disso, é possível considerar decisões de alocação de cargas em caminhos de rotas alternativos. Em virtude da falta capacidade para atendimento nas cargas em rotas preferenciais escolhidas pelos embarcadores, existe a necessidade de designar o atendimento a outros caminhos de rota na tentativa de evitar a rejeição da carga.

SAD de nível operacional

O modelo proposto auxilia nas decisões em nível operacional diferentemente dos modelos encontrados na literatura (BANDEIRA, BECKER, & BORENSTEIN, 2009; BROUER et al., 2011; TEIXEIRA & CUNHA, 2012).

Planejadores devem focar suas habilidades em outros detalhes da operação para reduzir custos e aumentar rentabilidade, com melhor utilização da capacidade. A eficiência desse SAD proposto permite uma precisa tomada de decisão.

1.7 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 2 é apresentado um referencial teórico sobre transporte de contêineres, problema de alocação de cargas e reposicionamento de vazios, estudos anteriores que auxiliam na definição e formulação do problema, e o sistema de apoio à decisão.

No capítulo 3 é apresentada a abordagem proposta trabalho, com o detalhamento de cada etapa executada, enfatizando os métodos e as ferramentas utilizadas.

No capítulo 4, o modelo de alocação de cargas e reposicionamento de vazios proposto neste trabalho é detalhado, partindo da caracterização do problema e seguindo para as considerações e premissas da modelagem. Na sequência, os elementos e notações do modelo são apresentados, seguido da representação da rede espaço-tempo e da formulação matemática.

No capítulo 5, os aspectos de implementação em linguagem computacional são detalhados, abordando característica, modelo de dados, processamento do modelo, customizações e verificações do modelo.

No capítulo 6 são apresentados os experimentos computacionais para um problema pequeno e para um problema grande. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do estudo, seguido de referencial teórico, apêndices e anexos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em seis seções. A primeira seção trata do transporte de contêineres em modal marítimo e as principais decisões envolvidas nos diferentes níveis. Na segunda seção são apresentadas algumas considerações adicionais com relação ao modelo de transporte, modelo de transbordo e rede espaço-tempo, relevantes para o entendimento da abordagem proposta e para a sistematização do modelo proposto. Em sequência é abordado o problema de alocação de cargas e de reposicionamento de vazios, suas características, entidades e atividades envolvidas. Na última seção, são abordados os trabalhos anteriores relacionados.

2.1 TRANSPORTE DE CONTÊINERES EM MODAL MARÍTIMO

O processo de containerização surgiu por volta de 1960 com o intuito de melhorar o serviço no transporte de cargas por diversos modais de transporte, tanto nos aspectos de custos operacionais quanto da qualidade do serviço oferecido (CULLINANE & KHANNA, 2000). A utilização desse equipamento no transporte de mercadorias cresce cerca de 15% anualmente. As principais razões para este processo é o aumento da acessibilidade a múltiplos modais de transporte, da segurança do transporte de carga, da redução dos custos de manuseio e da padronização (CRAINIC & KIM, 2005).

As companhias de navegação possuem uma importante vantagem competitiva quanto ao manuseio de cargas com as operações de containerização, em vista à modernização portuária, ao aumento da capacidade dos navios de contêineres e alianças firmadas entre estas companhias que ocasionaram maior viabilidade na utilização do equipamento em busca do ganho de escala. Além desses fatos, o contêiner é um importante elemento de inovação no comércio internacional, permitindo a redução de riscos de perdas nas mercadorias, ao trabalhador e ao meio ambiente, além de aumentar a segurança durante todo o processo de movimentação e transporte. Em resposta à esta evolução, os portos e terminais são também adequados com rápido investimento em infraestrutura para permitir receber esses navios de maior capacidade (CULLINANE & KHANNA, 1999, 2000).

Os contêineres são definidos como grandes caixas de metal com tamanhos padronizados que facilitam as atividades de carregamento de cargas de vários tipos, características ou quantidades de diferentes produtos. A medida TEU (*“twenty feet equivalent unit”*) representa uma medida base do container equivalente a diferentes comprimentos; 1 TEU equivale a um

contêiner com 20 pés de comprimento; e 2 TEUs equivale a um contêiner com 40 pés de comprimento (CARLO, VIS, & ROODBERGEN, 2014).

Nas operações de transporte de contêineres, os navios têm aumentado seu tamanho e eficiência. Na essência, a tecnologia de contêiner que conduz o negócio é, basicamente, a mesma de décadas atrás. As companhias de navegação investem em navios de contêineres maiores nas principais rotas, em busca de economia de custos por meio da obtenção de economias de escala, como demonstrado por Cullinane & Khanna (1999).

É percebido que as companhias de navegação insistem em um modelo de planejamento que utiliza sistemas transacionais e de apoio gerencial a nível de relatórios, não se preocupando com decisões integradas que considerem as diversas variáveis e decisões conflitantes em busca de uma redução de custo e um aumento da receita. De tal forma, de modo a suprir a demanda no transporte de contêineres, investimentos em navios maiores são realizados, sendo que, com baixos investimentos, é possível a incorporação de sistemas de apoio à decisão, para que os recursos sejam aplicados e potencializados no uso da sua capacidade.

O gerenciamento do transporte de contêineres envolve decisões em níveis estratégico, tático e operacional. A Figura 1 ilustra os níveis de planejamento e o fluxo de informações, enfatizando as principais atividades de planejamento a serem executadas.

Conforme Agarwal & Ergun (2008), no nível estratégico, os tomadores de decisão têm por objetivo adquirir recursos necessários para executar as operações e determinar variedade e tamanho de frota. Essas decisões são extremamente importantes, considerando os altos custos envolvidos na capacidade ociosa de navios.

Em um nível tático de decisão, a rede de serviços é determinada com base na definição de rotas de navios. No serviço regular de transporte de contêineres realizado por cabotagem, os navios seguem por rotas de serviço cíclicas por diversos portos ao longo do horizonte de planejamento. De modo a permitir maior confiabilidade dos clientes nos serviços oferecidos, as empresas de navegação garantem um embarque de navio para cada porto dentro da rota de serviço definida (AGARWAL & ERGUN, 2008).

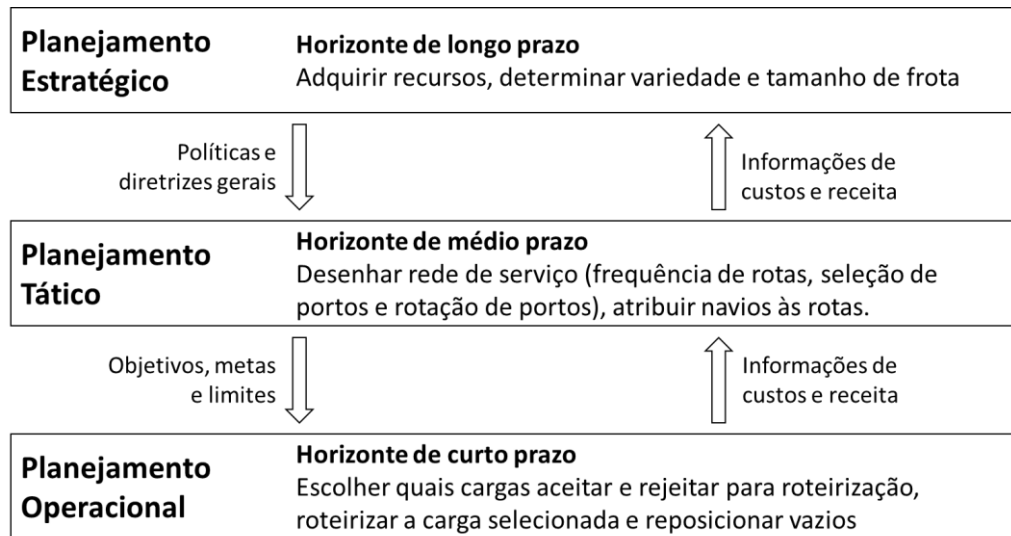


Figura 1 – Níveis de planejamento para companhias no transporte de contêineres.
Fonte: adaptado de Agarwal & Ergun (2008)

No nível operacional, em virtude da variabilidade da demanda e da complexidade das operações, há falta de capacidade para atendimento de clientes em determinados portos e períodos do horizonte de planejamento na rede de serviços. Para esse problema, cabe decisões de aceitar ou rejeitar requisições de clientes, bem como propor caminhos de rota a serem utilizados para o transporte das cargas. Este problema é denominado *cargo-routing-problem* ou Problema de Roteirização de Carga (AGARWAL & ERGUN, 2008).

Semelhante ao problema de *cargo-routing-problem*, Brouer, Pisinger & Spoorendonk (2011) propõem um modelo para resolver o CAPER (“*cargo allocation problem with empty repositioning*”), ou seja, um problema de alocação de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios. O modelo proposto por Brouer et al. (2011) considera premissas para apoiar decisões a nível estratégico, não tratando o modelo para decisões a nível operacional, no curto prazo e com o desdobramento esperado da demanda. O CAPER considera uma junção do problema de roteirização de cargas e do problema de reposicionamento de vazios com aceite ou rejeição de cargas.

Agarwal & Ergun (2008) também argumentam que as decisões de um nível de planejamento afetam as decisões nos demais níveis. As políticas e diretrizes gerais definidas no nível estratégico são a base para decisão nos níveis abaixo. De acordo com os recursos previamente definidos a nível estratégico, são estabelecidas limitações de capacidade e de estrutura da rede no nível tático que irão nortear a realização dos atendimentos no nível operacional mediante planejamento desagregado. As informações de custo e de receita são

alimentadas como dados de entradas em todos os níveis, com diferentes níveis de agregação, para decidir futuras intervenções.

2.2 MODELOS DE REDE

Os modelos de rede são eficazes para resolução de problemas de fluxo de elementos inteiros, permitindo uma rápida resolução. A combinação de modelo de fluxo em rede com modelo combinatório de alocação pode aumentar a eficiência na resolução de problemas de alocação de cargas e reposicionamento de vazios, em vista dos bons resultados obtidos de propostas encontradas na literatura (TEIXEIRA, 2011; TEIXEIRA & CUNHA, 2012; ZAMBUZI & CUNHA, 2010). Desse modo, é importante enfatizar o modelo de transbordo e o seu endereçamento para resolução de problema de rede espaço-tempo acerca do problema considerado nessa pesquisa.

2.2.1 Modelo de transporte

Para entendimento do modelo de transbordo, é importante entender o modelo de transporte, extraído de Winston (2004), que não considera fluxo em pontos de transbordo. São definidos índices, variáveis e constantes para o modelo conforme Quadro 1.

Notação	Descrição
m	número de pontos de abastecimento
n	número de pontos de demanda
x_{ij}	número de unidades embarcadas do ponto de abastecimento i para o ponto de demanda j
c_{ij}	custo para transportar uma unidade do ponto de suprimento i para ponto de demanda j
s_i	abastecimento no ponto i
d_j	demanda no ponto j

Quadro 1 – Notações para modelo de transporte.
Fonte: adaptado de (WINSTON, 2004)

As equações de (1) e (4) definem as restrições para o modelo de transporte; a função objetivo definida na expressão (1) busca a minimização dos custos dos fluxos entre cada origem e destino. A restrição (2) garante que toda a origem forneça toda sua quantidade disponível a um ou mais destinos, enquanto que a restrição (3) garante que todo o destino receba uma quantidade mínima de um ou mais origens. Todas as variáveis nesse modelo são positivas.

$$\min \sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=n} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i \quad \forall (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \quad \forall (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

Em um modelo de fluxo em rede, com dados os custos e capacidades inteiras, a solução ótima do problema é inteiro, mesmo considerando as variáveis como contínuas, em vez de inteiras. Essa propriedade facilita a resolução de problemas que utilizam uma abordagem de fluxo em rede.

2.2.2 Modelo de Transbordo

Como uma extensão do modelo de transporte, os modelos de transbordo permitem que haja fluxo não somente em caminho diretos de um ponto de abastecimento até um o ponto de demanda, mas também permitem que o fluxo ocorra em um ou mais pontos de transbordo, momento em que a *commodity* que está em fluxo possa ser transbordada na sua viagem do ponto de abastecimento até o ponto de demanda (ORDEN, 1956).

Assim como no modelo de transporte original, pode-se definir um local de abastecimento como o ponto para enviar a *commodity* para outro ponto, e o ponto de demanda como um local que pode receber mercadorias. Entretanto, considerando uma derivação para o modelo de transbordo, o ponto de abastecimento não pode receber bens de outro ponto, assim como o ponto de demanda não pode enviar *commodity* para qualquer outro ponto. Por fim, um ponto de transbordo é um local que pode receber a *commodity* de outros pontos e enviá-la para outros locais (WINSTON, 2004).

A Figura 2 ilustra um problema de transbordo, onde são definidos seis pontos; cada ponto é representado como um nó e todos os arcos são direcionados. Os pontos A e B são pontos de abastecimento, C e D são pontos de transbordo e os pontos de demanda são os pontos E e F.

Não há arcos que terminam em nó de abastecimento, bem como não há arcos que iniciam no nó de demanda. Entretanto, há arcos que terminam ou iniciam no nó de transbordo.

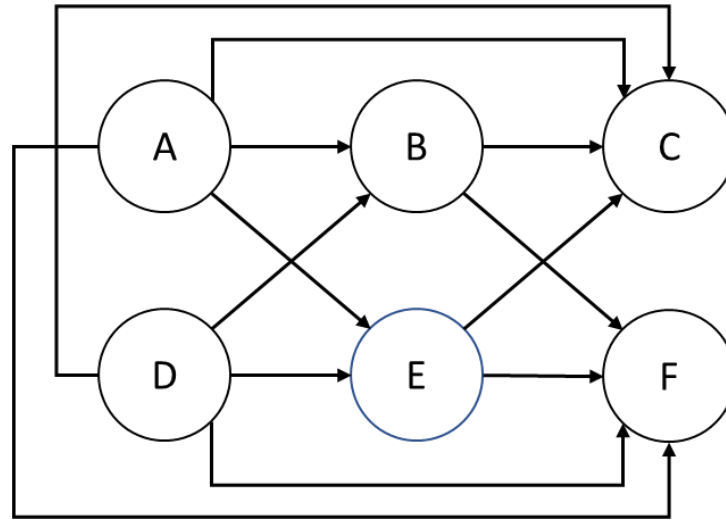


Figura 2 – Um problema de transbordo
Fonte: Adaptado de (WINSTON, 2004)

Em um modelo para o problema de transbordo, as equações (2) e (3), que tratam da oferta e da demanda, respectivamente, são substituídas por uma única equação que trata o transbordo como um equilíbrio da rede. A equação (5), adaptada do modelo proposto por Teixeira (2011), ilustra esta adequação, conforme padrão da formulação de Winston (2004). Para cada nó i , a demanda conhecida d_i deve ser igual à subtração das demandas (entradas) pelas ofertas (saídas). Quando a $d_i - s_i = 0$, considera-se o nó i como de transbordo, onde a demanda deverá ser igual à oferta. Caso contrário, a demanda e a oferta serão diferentes, sendo considerado o nó i como um nó de oferta ou demanda.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = d_i - s_i \quad \forall (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

2.2.3 Rede espaço-tempo

Um *state space diagram*, conforme descrito por Simpson (1969) de modo a resolver um problema de aeronaves, permite uma formulação de programação dinâmica que considera mudanças de estado dos elementos ao longo do tempo. Na representação proposta, os nós representam uma posição no espaço-tempo para a aeronave. O diagrama é essencialmente um mapa de rota onde os nós são interligados em períodos diferentes, caracterizando movimentação ao longo do tempo.

Nos nós de estação podem haver decisões para “despacho” e para “chegada” de aeronaves. Os nós de estação são chamados nós de “evento”, bem como os nós de chegada. O arco que representa a decisão de despacho é chamado de arco de “despacho”. O custo ou valor dos arcos de despacho é o rendimento dado para o serviço. Todos os outros arcos têm custo zero.

Uma rede espaço-tempo também segue as concepções de um *state space diagram*. White & Bomberault (1969) trataram de um problema de movimentação de veículos vazios utilizando modelos de fluxo em rede, analisando a distribuição de vagões de trens. Para o problema de movimentação de vazios, Zambuzi & Cunha (2010) desenvolveram um modelo utilizando os conceitos de rede espaço-tempo. Em mesma linha de pesquisa, para o problema de seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios, Teixeira & Cunha (2012) propuseram uma rede espaço-tempo para um modelo de fluxo máximo multiproduto permitindo fluxo de contêineres cheios e vazios aplicando um mudança de estado. A Figura 3 ilustra um exemplo de rede espaço-tempo, conforme Teixeira & Cunha (2012).

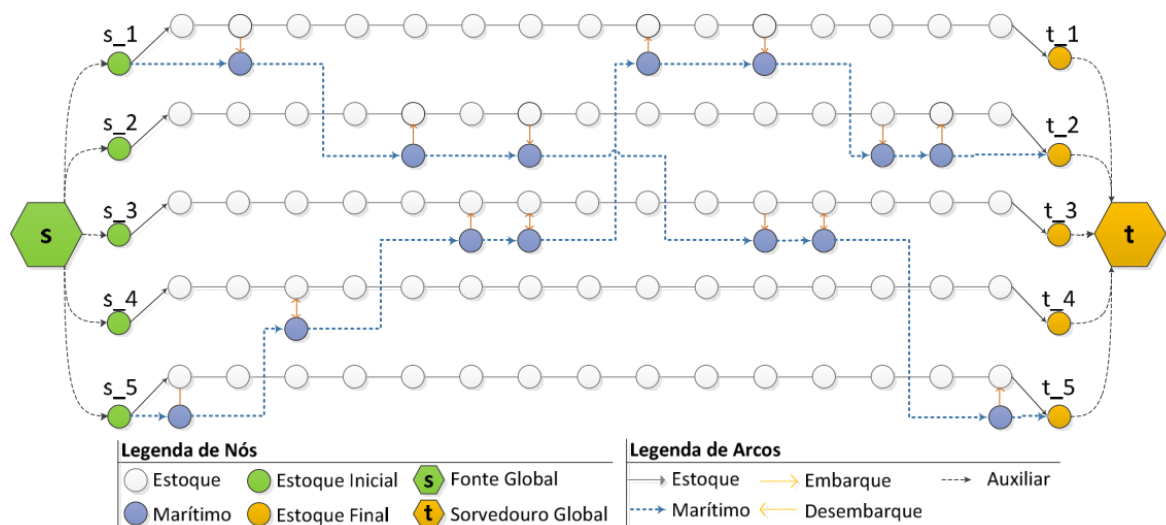


Figura 3 – Exemplo de uma rede espaço-tempo para transporte de contêineres.
Fonte: TEIXEIRA & CUNHA (2012)

Conforme a Figura 3, foram considerados nós marítimos, de estoque, de fonte local e de sorvedouro local, além de um nó de fonte global e um nó de sorvedouro global. Para determinar o fluxo entre os nós da rede, os autores definiram arcos marítimos, de estoque, de embarque, de desembarque e auxiliares, representando as atividades na rede de serviço para atendimento ao transporte de contêineres cheios e o reposicionamento de vazios. A rede espaço-tempo fornece uma flexibilidade para a representação de atividades distintas e de eventos em um problema dinâmico, onde os estados mudam ao longo do tempo.

2.3 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE VAZIOS

O problema de alocação de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios é similar ao problema de gerenciamento de receita para carga aérea (BARTODZIEJ & DERIGS, 2004), apesar de não se apoiar em contêineres. O custo de reposicionamento de contêineres vazios deve ser considerado no modelo de alocação de carga em virtude do desbalanceamento entre oferta e demanda em diferentes regiões ao longo de uma operação de cabotagem (BROUER et al., 2011).

As companhias de navegação enfrentam o problema de alocação de contêineres vazios, dado o descompasso entre oferta e demanda, enfatizado no fato de que a rejeição de carga por falta desses equipamentos para o transporte é altamente indesejada na prática, em vista à intensa competição no mercado (SHINTANIA, IMAIB, NISHIMURAB, & PAPADIMITRIOUC, 2007).

Entretanto, na busca pelo alto nível de serviço para os seus clientes, as companhias de navegação acumulam um alto número de contêineres vazios em portos de maior importação e, ao mesmo tempo, solicitam um grande número desses equipamentos em portos de maior exportação. Essa forma de operação – que busca solucionar o problema constante do desequilíbrio entre oferta e demanda nos portos – ocasiona altos custos que limitam uma maior margem de contribuição (LI, LEUNG, WU & LIU, 2007). O aumento da capacidade dos navios é uma alternativa encontrada pelas companhias de navegação frente à concorrência, dada a complexidade nas operações. Song et al. (2005) estimam que o reposicionamento de vazios representa 27% do custo total da frota mundial.

Em geral, para a área de transporte regular de contêineres, a literatura não apresenta modelos que tratam da rejeição de carga, principalmente para o problema de alocação de cargas, embora a capacidade limitada de uma companhia de navegação possa exigir tal rejeição, gerando receita com demanda derivada do reposicionamento vazio (BROUER et al., 2011). Nesse contexto, os autores propuseram um modelo para alocação de cargas com reposicionamento de contêineres vazios, denominado CAPER, considerando a rejeição de carga.

O problema CAPER é estruturado como um problema de fluxo multiproduto, tendo como base o problema de reposicionamento de vazios onde são consideradas restrições de transbordo (CRAINIC, DEJAX & DELORME, 1989), de modo a assegurar o reposicionamento

ou *leasing* de contêineres vazios em portos com um fluxo positivo em uma rede. O problema de fluxo em rede para reposicionamento de vazios pode ser resolvido por programação linear, sendo considerado de complexidade polinomial.

Por outro lado, a combinação do problema de reposicionamento de vazios com o problema de alocação de cargas ocasiona decisões de escolha de caminhos em rotas, bem como de aceite ou rejeição de cargas para o transporte. Desse modo, Brouer et al. (2011) consideram o CAPER um problema de programação inteira em um fluxo multiproduto e, assim, considerado de complexidade *NP-hard*.

O CAPER consiste em uma ferramenta estratégica para a avaliação da rede e seleção de carga, na qual o reposicionamento de contêineres vazios é um componente de custo significativo do problema de alocação de cargas (BROUER et al., 2011). O transporte de contêineres vazios e cheios é compartilhado na capacidade de uma rede de serviços, bem como a demanda por contêineres vazios é derivada da alocação de contêineres cheios. Entretanto, devido à complexidade computacional desse tipo de problema, a ideia da modelagem foi inicialmente rejeitada por Crainic et al. (1993).

Brouer et al. (2011) consideram uma rede para o CAPER para um horizonte de planejamento discreto em um esquema de horizonte rolante. O horizonte de tempo pode ser divididas em *slots* de tempos de igual tamanho por um divisor comum (ex: um dia), dado que um detalhamento da rede pode tornar o problema muito grande, tornando-o intratável para propostas práticas. Os autores propuseram intervalos de tempo maiores, por meio de agregação da rede, para produzir uma rede melhor em virtude do CAPER ser modelado para planejamento estratégico, assumindo tal premissa como razoável.

Para resolver o CAPER, uma rede espaço-tempo é criada como um grafo acíclico direcionado e capacitado onde há um nó para cada combinação de portos e tempo (discreto). Os estoques são representados como conjunto de arcos não-capacitados, sendo o estoque de um porto entre dois períodos de tempo subsequentes. As viagens são representadas como conjunto de arcos capacitados entre dois portos diferentes.

A *commodity* é definida como uma demanda em número de contêineres, um porto de origem, um período origem, um porto de destino e período destino, com um preço de venda por unidade de contêiner (BROUER et al., 2011). O suprimento de contêineres para atendimento dessa demanda é considerado como um custo para o arco de viagem. Para esse

problema, Brouer et al. (2011) incorporaram também opções de *leasing* de contêineres com um novo conjunto de variáveis associadas às restrições de balanceamento da rede com o custo associado à função objetivo. Uma carga pode ser rejeitada em virtude de restrições de capacidade e a não rentabilidade frente ao custo de reposicionamento. Variáveis de falta representam a quantidade rejeitada de demanda. Custos de transporte, *leasing* e demanda derivada de reposicionamento de vazios são deduzidos da receita gerada, resultando na margem de contribuição do modelo.

Uma vez introduzido o CAPER, que possui enfoque no nível estratégico, é importante definir as principais características do problema de alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios para o nível operacional, considerando o fato que sua modelagem nesse contexto ainda não foi encontrada na literatura.

Vale ressaltar que a separação na movimentação de contêineres vazios dos contêineres cheios é apropriada se toda a demanda no transporte de cargas é satisfeita. Do contrário, é importante considerar ambos os problemas de modo unificado (SHINTANIA et al., 2007). A junção dos problemas em um único modelo de otimização é altamente encorajada em um cenário de capacidade restrita, onde há desbalanceamento entre oferta e demanda de contêineres nos portos.

A rede de serviço de transporte regular de contêineres, por companhias de navegação, é constituída, principalmente, de portos marítimos e navios de contêineres em um sistema de transporte marítimo com uma topologia de serviços semanais ao longo de um horizonte de planejamento de característica rolante (BROUER et al., 2011). No nível operacional, são considerados horizontes variando de 30 a 60 dias, ao fato de que as requisições de cargas são confirmadas à curto prazo.

Potencializada pelo desenho da sua topologia, a rede de serviços permite transbordos de contêineres entre navios em um mesmo porto, por meio de atividades conjugadas de desembarque em um navio, armazenamento temporário no porto de transbordo e embarque em outro navio, após determinado período de tempo (BANDEIRA et al., 2009; BROUER et al., 2011). Toda a operação pode ocorrer no mesmo dia. Tipicamente não ultrapassa uma semana, em virtude dos custos extras e do nível de serviço ao cliente. Tal condição pode afetar a decisão e inviabilizar o transbordo para um tempo superior a uma semana.

Em virtude da topologia da rede definida (que é totalmente conhecida no contexto operacional), todos os possíveis e viáveis caminhos nas rotas dos navios podem ser definidos, levando em conta também os transbordos (BROUER et al., 2011).

O modelo proposto nesta pesquisa trata do problema de alocação de cargas com reposicionamento de vazios, considerando rejeição de cargas, levando em conta variáveis com maior detalhe para decisões operacionais.

Os portos podem ser agrupados em regiões que consideram os aspectos geográficos, econômicos e sociais. Esses aspectos influenciam a oferta e demanda no transporte de contêineres em cada uma das regiões. É importante considerar esse fato, dado que os portos possuem, na prática, desequilíbrio entre oferta e demanda, o que evidencia a importância de tratar o problema de reposicionamento de vazios de maneira unificada ao problema de alocação de cargas.

Por fim, a rentabilidade é considerada como o principal fator para decidir pelo aceite, alocação ou rejeição da requisição do embarcador. Essa rentabilidade pode ser definida como uma margem de contribuição para cada ordem de transporte e carga tal como um conjunto de requisições de um ou mais embarcadores (TEIXEIRA & CUNHA, 2012).

2.3.1 Principais entidades do problema

A seguir, são apresentadas as principais entidades envolvidas no problema de alocação de cargas com reposicionamento de contêineres vazios:

- a) **Companhia de Navegação:** é uma empresa de transporte ativa em um ou mais dos seguintes: (i) armadores; (ii) negociando, incluindo corretagem de navio, *forward freight agreement* (FFA) e transporte marítimo; (iii) operações de transporte; (iv) inovações comerciais e técnicas. Companhia que transporta produtos ou pessoas pelo mar em seus navios ou equipamentos é chamada de *carrier* no contrato de transporte (LORANGE, 2009).
- b) **Embarcador:** É uma entidade que confia em uma companhia regular de navegação que tem a responsabilidade de transportar seus produtos e *commodities*. Na indústria de transporte de carga, o papel do embarcador é vital. Pode ser compreendido também como pessoa contratual que possui um contrato com uma companhia de navegação (GÜNER-ÖZBEK, 2008).

- c) **Requisição de transporte:** É uma ordem escrita ou solicitação formal do embarcador para o transporte de produtos por uma companhia de transporte, contendo todos os requisitos necessários e que precisam ser respeitados para o atendimento (HINKELMAN, 2012). No transporte de contêineres, sua definição pode ser tratada simplesmente como “carga”, que é um conjunto de bens ou mercadorias que são transportadas por navios e que podem ser consolidadas por meio de equipamentos, como contêineres (TEIXEIRA, 2011; TEIXEIRA & CUNHA, 2012).
- d) **Porto marítimo de contêineres:** Pode ser definido como um centro logístico e industrial de natureza puramente marítima, que desempenha um papel ativo no sistema de transporte global (para carga em contêineres); se caracteriza por um agrupamento espacial e funcional de atividades no processo em cadeias de produção (NOTEBOOM, 2001). Trata-se de um local à costa que contém um ou mais terminais para que os navios possam atracar e transferir pessoas ou cargas para ou da terra. Os locais dos terminais são selecionados para otimizar o acesso à terra e à água navegável, para a demanda comercial e para o abrigo do vento e das ondas.
- e) **Navio de contêineres:** É um navio, também conhecido como porta-contêineres, utilizado para transporte carga acondicionada em contêineres. É um meio comum de transporte intermodal comercial de mercadorias. Os contêineres são carregados em posições altas que estendem de três a cinco contêineres abaixo do convés (HINKELMAN, 2012).
- f) **Contêiner:** Uma caixa grande, reutilizável e resistente para a consolidação de caixas ou caixas menores em uma única remessa, projetada para o carregamento e descarregamento fácil e rápido do frete (AGERSCHOU, 1983; VIS & KOSTER, 2003). Possui especial design que facilita movimentação das mercadorias, por um ou mais modos de transporte, sem recarga intermediária e concebido para ser fácil de preencher e esvaziar (HINKELMAN, 2012).

2.3.2 Principais atividades do problema

São várias as atividades e entidades envolvidas no transporte de carga por contêineres em via marítima. Considerando um planejamento à nível operacional para decisões de alocação de cargas com reposicionamento de vazios conforme abordado nessa pesquisa, de acordo com Teixeira (2011), são enfatizadas:

- a) **Requisitar o transporte por contêineres:** todo o transporte de carga por companhias regulares de navegação é realizado mediante requisições de transporte pelos embarcadores. A requisição fornece todas as informações necessárias para realizar o transporte.
- b) **Estocar os contêineres vazios:** os contêineres vazios permanecem estocados em um dos portos da rede de serviço nos terminais de contêineres.
- c) **Alocar contêineres vazios:** os contêineres vazios são alocados à carga aceita para o transporte.
- d) **Estufar mercadorias nos contêineres:** nessa atividade, os contêineres vazios alocados para a carga são preenchidos com a mercadoria. Após esta atividade, os contêineres permanecem disponíveis em momento anterior ao embarque no porto.
- e) **Embarcar contêineres cheios:** uma vez que os contêineres cheios estão disponíveis para o embarque, a movimentação desses contêineres para dentro do navio é realizada quando o mesmo se encontra atracado no terminal correspondente. Movimentações extras podem ser necessárias para o rearranjo da carga dentro do navio.
- f) **Transportar contêineres cheios:** após os procedimentos de embarque dos contêineres, o navio continua sua viagem para o próximo porto dentro de sua rota.
- g) **Transbordar contêineres cheios:** durante as viagens dos navios em suas rotas, transbordo de contêineres entre navios, que coincidam parada em mesmo porto, pode estar programado para realizar atendimento de uma determinada carga ou para reposicionamento de vazios. Durante a atividade de transbordo são realizadas atividades de desembarque de um navio, estocagem no porto em comum e embarque em um outro navio, nessa mesma sequência.
- h) **Desembarcar contêineres cheios:** com o navio atracado em um porto, os contêineres cheios que se destinam àquele porto são desembarcados com uma movimentação desses contêineres para fora do navio. Movimentações extras podem ser necessárias para rearranjo da carga dentro do navio.
- i) **Reposicionamento de vazios:** de modo a ajustar os estoques de contêineres nos portos em vista ao desequilíbrio entre a oferta e a demanda nos portos, o reposicionamento de vazios poderá ocorrer, sendo realizado por atividades de embarque de vazios no navio no porto de origem, transporte até um porto de destino e desembarque no porto de destino. Transbordos poderão ocorrer nesse processo.

2.4 ABORDAGENS DA LITERATURA PARA ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE VAZIOS

O problema de alocação de cargas de contêineres cheios e reposicionamento de contêineres vazios são altamente correlacionados em decisões de planejamento realizadas por companhias de navegação. De um lado, as cargas transportadas influenciam diretamente o balanceamento entre o suprimento e a demanda de contêineres vazios nos portos. Por outro lado, decisões de reposicionamento de contêineres vazios de um porto de origem para um porto de destino permitem escolher cargas que são mais rentáveis para o transporte. Pesquisas relevantes sobre decisões de transporte envolvendo ambos os problemas são encontradas na literatura.

Decisões relacionadas às operações de transporte de contêineres são feitas em diferentes níveis de planejamento, mas sempre são interacionadas, conforme Agarwal & Ergun (2008). Um nível tático na determinação de rotas de navios invariavelmente afeta os resultados de alocação de cargas no nível operacional. Embora muitos trabalhos na literatura considerem o problema reposicionamento de contêineres vazios para tomada de decisão a nível operacional (BANDEIRA et al., 2009; CHANG, LAN, & LEE, 2015; TEIXEIRA & CUNHA, 2012; ZAMBUZI & CUNHA, 2010), alguns trabalhos têm abordado este problema em conjunto com decisões de nível tático e estratégico, tais como de desenho da rede de serviços (AGARWAL & ERGUN, 2008; BROUER, DESAULNIERS, & PISINGER, 2014; IMAI, SHINTANI, & PAPADIMITRIOU, 2009; MENG & WANG, 2011), determinação de frota e rota de navios (BRANCHINI, ARMENTANO, & MORABITO, 2015) e na otimização de velocidade de navios (FAGERHOLT, GAUSEL, RAKKE, & PSARAFTIS, 2015; PSARAFTIS & KONTOVAS, 2014). No que diz respeito ao problema de alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios, conforme observado por Tran & Haasis (2015), são poucas pesquisas que consideram os problemas simultaneamente (BROUER et al., 2011; SHINTANIA et al., 2007; D.-P. SONG & DONG, 2012).

Inicialmente, Ronen (1983) analisou a programação e o roteamento de navios, bem como os modelos relacionados, propondo uma classificação para os problemas de roteamento e de programação de embarcações. O objetivo da roteirização e da programação dos navios nem sempre é claro. No caso das operações regulares, as companhias de navegação buscam o lucro por unidade de tempo no longo prazo, mas desviam desse objetivo no curto prazo a fim de ganhar quota de mercado.

Mais recentemente, Christiansen, Fagerholt, Nygreen, & Ronen (2013) realizaram uma pesquisa sistemática que permitiu demonstrar que diversos estudos sobre roteamento e programação de navios floresceram na última década. O volume de publicações sobre esses temas mais que dobrou, além da variedade de problemas tratados. Apesar de todos os desenvolvimentos apontados pelos autores, problemas complexos continuam a ser endereçados (BELLI, LIU, RIOULT, & AMGELOUDIS, 2013; BROUER et al., 2014; CHOONG, COLE, & KUTANOGLU, 2002; DONG & SONG, 2009; NORSTAD, FAGERHOLT, & LAPORTE, 2011; Y. WANG, MENG, & DU, 2015). Algumas das pesquisas recentes abordam problemas menos fundamentados em operações reais, mas que se concentram mais em contribuições teóricas e que criam a necessidade de conjuntos de dados de referência para os diferentes tipos de problemas.

Choong, Cole & Kutanoğlu (2002) desenvolveram um modelo para redes intermodais no planejamento tático do transporte de contêineres vazios em barcaças, buscando uma utilização mais completa dos recursos existentes no rio e a redução da pressão de tráfego nas rodovias e ferroviárias. O impacto observado depende do número e da localização dos estoques de contêineres vazios para o transporte das mercadorias. Os resultados mostraram os impactos sobre o horizonte de planejamento no que diz respeito à concentração de atividades, tempo de transporte e os efeitos no final do horizonte de planejamento.

Nesse mesmo contexto, Agarwal & Ergun (2008) propuseram um modelo integrado de programação linear inteira mista para resolver um problema de sequenciamento de navios e de roteirização de cargas, considerando simultaneamente restrição de frequência semanal nas rotas operadas e transbordo de cargas entre dois ou mais rotas de serviço. O programa inteiro misto foi resolvido por uma “*Greedy Heuristic*”, um algoritmo baseado em geração de coluna e um outro baseado na decomposição de “*Benders*” em duas fases. Os resultados apontam alta utilização da capacidade dos navios e um número significativo de transbordos.

Bandeira et al. (2009) trataram do problema de transporte de contêineres cheios e vazios tratando do problema do desbalanceamento entre importação e exportação nos portos. O problema é modelado como uma rede, cujo modelo matemático é operado em duas fases. Na primeira fase é priorizado o transporte de cheios e, numa segunda fase, o transporte de vazios. Toda modelagem foi encapsulada em um sistema de apoio à decisão (SAD) que permite de forma flexível alterar diversos parâmetros do modelo de modo a executar diversos experimentos.

Imai et al. (2009) trataram do desenho da rede no gerenciamento do transporte de contêineres incluindo o reposicionamento de contêineres vazios, examinando duas redes de serviço típicas: com múltiplos portos por tamanho de navios convencionais e *hub-and-spoke* por navios maiores. Os autores propuseram uma modelagem matemática baseada numa rede espaço-tempo para contêineres homogêneos e em que toda a demanda de carga nos portos é satisfeita (ou seja, não há possibilidades de rejeição de cargas para atendimento das restrições de capacidade). Foi identificado que a representação convencional é superior à *hub-and-spoke* em termos de custos na gestão de contêineres para todos os cenários. Na mesma linha, Meng & Wang (2011) propuseram um modelo matemático inteiro misto para aplicação em problemas baseados em operações de transportes reais, mostrando a eficiência do modelo em termos da potencial economia em custo na gestão de contêineres. Os autores observaram que a maior economia de custo foi na combinação entre rede *hub-and-spoke* e convencional.

Dong & Song (2009) consideraram, de maneira integrada, o problema de dimensionamento de frota e reposicionamento de contêineres vazios para múltiplos navios, múltiplos portos e múltiplas viagens, em um sistema de transporte com dinâmica, incerteza e demanda de cargas desbalanceadas. São poucos os trabalhos que abordam a incerteza no planejamento de contêineres. Uma otimização com simulação é desenvolvida baseada em algoritmo genético, visando a otimizar o tamanho da frota de contêineres e, de acordo com um algoritmo heurístico simples, os parâmetros das políticas de reposicionamento são definidos. Além de apresentar resultados que permitem alcançar os objetivos propostos, o estudo confirmou que o problema de dimensionamento de frota e reposicionamento de contêineres vazios são altamente correlacionados.

De acordo com o problema de sequenciamento e roteirização de navios de transporte ocasional, Norstad, Fagerholt & Laporte (2011) desenvolveram um modelo visando a maximizar o lucro, deduzindo custos operacionais do faturamento total de frete. As decisões envolvidas consideram a seleção das cargas para o transporte, atribuição das cargas aos navios, determinação das rotas ótimas para cada navio e determinação dos horários ótimos dos navios com base na velocidade ideal e da rota de navegação. Foram propostos dois algoritmos, de modo que o algoritmo de suavização recursiva resultou em mais rapidez, mas somente sendo aplicável nos casos em que as funções de consumo de combustível dos navios não dependem da carga do navio, mas apenas na velocidade.

Teixeira & Cunha (2012) propuseram uma modelagem para o problema de aceite e rejeição de carga de contêineres cheios em conjunto com o problema de reposicionamento de contêineres vazios no nível operacional para uma rede de transporte com múltiplas rotas de serviço, múltiplas embarcações, múltiplas viagens regulares e múltiplos tipos de contêineres. O objetivo do modelo é maximizar a margem de contribuição líquida, considerando custos de movimentação de contêineres vazios e a margem de contribuição para cada carga aceita para o transporte. Os autores consideraram, na rede de serviços considerada, atividades de estocagem, embarque, transporte e desembarque de contêineres cheios e vazios, bem como períodos de estadia dos contêineres antes do embarque e após desembarque, apresentando o ciclo dos contêineres cheios e vazios. Um modelo de otimização misto e inteiro de uma rede de fluxo máximo baseado numa rede espaço-tempo multiproduto foi desenvolvido, integrando os problemas de transporte de contêineres cheios e vazios. O modelo foi aplicado a instâncias de pequeno e grande porte condizentes com a realidade, com tempos computacionais reduzidos.

O modelo proposto por Teixeira e Cunha (2012) abordou o mesmo problema tratado por Cuoco (2008) com abordagem baseada em rede espaço-tempo conforme modelo de Zambuzi & Cunha (2010), ao qual propuseram um modelo de planejamento de distribuição de vazios de modo a minimizar custos dessa distribuição considerando o desbalanceamento entre ofertas e demandas. O modelo é representado por uma rede espaço-tempo baseada num modelo de fluxo de rede multi-produto.

Bell, Liu, Rioult & Angeloudis (2013) apresentaram um modelo de atribuição de contêineres marítimos que leva em consideração o reposicionamento de contêineres vazios. A atribuição de contêineres cheios e vazios às rotas deve ser considerada em conjunto, levando em conta que o reposicionamento do recipiente vazio tem sido geralmente considerado como um problema separado. O modelo de programação linear proposto assume que o padrão de rotas, tamanhos de navios e frequências de serviço é fornecido.

Com uma abordagem de *matheuristic*, com a interpolação de metaheurística e técnica programação matemática, Brouer, Desaulniers & Pisinger (2014) propuseram um modelo para o problema de desenho da rede de transporte, de modo a buscar um conjunto de rotas de transporte de contêineres em uma rede capacitada. O objetivo do modelo proposto é maximizar a margem de contribuição, deduzidos os custos de operação na rede. Com base nos resultados obtidos, o modelo proposto apresentou ser uma valiosa ferramenta para mudanças incrementais em uma rede, analisando diferentes cenários durante a sua configuração.

Wang, Wang & Meng (2014) integraram o problema de programação de rotas e o problema de alocação de cargas no transporte marítimo. Foi proposto um modelo de programação matemática para maximizar a rentabilidade do operador, transformando um modelo de otimização não-linear em um modelo de programação inteira-mista equivalente. Desse modo, é garantida uma solução global ótima. O estudo de caso permitiu testar a aplicabilidade do modelo desenvolvido e a sua eficácia, tendo-se que o modelo apresenta um bom desempenho.

Chang et al. (2015) propuseram um modelo de programação linear para formular problema de transporte de contêineres cheios e vazios em uma estrutura de dois níveis. No primeiro nível, contêineres cheios são alocados nos navios para maximizar lucro operacional para cada rota de serviço. No segundo nível, os contêineres vazios são reposicionados de modo a reduzir os custos de transporte para a rede de serviços considerada. Por sua vez, Branchini, Armentano & Morabito (2015) pesquisaram sobre o problema integrado de roteamento, programação e implementação de frotas de viagens, considerando um horizonte temporal de três a seis meses de planejamento. Os autores utilizaram grafo direcionado com nós representando locais para a implementação de um modelo matemático inteiro-misto. Problemas com viagens utilizando navios particulares para cargas específicas tiveram maior lucro do que problemas sem utilização desses tipos de navios.

Karsten et. al. (2015) estudaram o problema de fluxo de rede multiproduto com restrições de tempo de trânsito de mercadorias por meio de uma rede de transporte de contêineres, com operação regular, no modal marítimo. As contrações do grafo proposto e as estruturas de transbordo mais simples reduzem o tempo de execução do problema de fluxo de rede multiproduto. Uma estrutura de arcos fantasmas foi recomendada para descrever operações de transbordo de contêineres, tendo como objetivo propor uma estrutura de rede “*State-Augmented Shipping*” (SAS) para construir a rede de transporte de contêineres integrada, de modo a auxiliar nas decisões em diversas aplicações de otimização da rede de transporte marítimo, estimando com precisão o custo total dos embarques de carga.

Wang, Liu & Bell (2015) propuseram um modelo de atribuição de contêineres baseado no lucro, considerando o fato de que a demanda no transporte de contêineres é dependente da taxa de frete. Inicialmente os autores trataram o problema com funções de demanda conhecida com base em um modelo de otimização não-linear para validar e melhorar a rede de transporte da companhia de navegação. Em um segundo momento, foram consideradas funções de

demanda desconhecida de modo a ajustar as taxas de frete para maximizar o lucro. O método experimental de tentativa e erro integra a otimização matemática com julgamento de especialistas e pode ser usado no nível operacional para maximizar o lucro.

Considerando as pesquisas mais recentes para a integração do problema de alocação de cargas e de reposicionamento de vazios, Shintania, Imaib, Nishimurab & Papadimitriouc (2007) estudaram uma abordagem integrada e abrangente para a otimização de todo o problema de projeto da rede considerando o tráfego de contêineres cheios e vazios, como dois subproblemas. A separação entre o problema de transporte de vazios e o problema de transporte de cheios é apropriada se toda a demanda de carga é satisfeita. No entanto, em cenários em que há escassez de capacidade em portos com demanda no transporte de contêineres, o tratamento em conjunto de ambos os subproblemas é necessário para projetar redes de serviços mais adequadas, dado que a receita é compensada pelos custos associados a essas operações.

Shintania, Imaib, Nishimurab & Papadimitriouc (2007) propuseram um método de projeto para roteirização de navios de contêineres que incorpora o problema de reposicionamento de contêineres vazios para portos com escassez na oferta desses equipamentos, com base no “*Knapsack problem*” (problema da mochila), sendo este reduzido a um “*Location Routing Problem*” (LRP). Foi proposta uma heurística baseada em algoritmo genético. A abordagem proposta foi apresentada como muito útil na avaliação de redes potenciais de navegação, tanto do ponto de vista estratégico como tático.

De acordo com os Brouer et al. (2011), o problema de reposicionamento de vazios é tratado em decisões operacionais. O problema de alocação de cargas e reposicionamento de vazios (CAPER) é considerado uma ferramenta estratégica para validação da rede e seleção de cargas, quando o reposicionamento de vazios é um componente de custo significativo para o problema de alocação de cargas. Brouer et al. (2011) estudaram o CAPER e desenvolveram uma formulação baseada num problema de fluxo multiproduto com restrições adicionais de balanceamento de fluxo para controle dos contêineres vazios. Os autores utilizaram o princípio Dantzig-Wolfe para decomposição de uma formulação de fluxo de arco para uma formulação de fluxo de caminhos. Com base numa relaxação linear, o problema é resolvido por um algoritmo de geração de colunas.

Brouer et al. (2011) consideraram demandas agrupadas por origem, destino, número de TEUs e preço de venda por unidade. Para essas demandas não há conhecimento de caminho

preferencial ou janela de tempo para atendimento. É considerado o *leasing* de contêineres para atendimento da demanda, apesar de que é possível a rejeição parcial ou total da carga por falta de capacidade e pela não rentabilidade no reposicionamento de vazios.

Song & Dong (2012) consideram o problema de alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no nível operacional com objetivo de minimizar custos totais, tais como custos de *lifting* de contêineres em portos, custos de atrasos na demanda de clientes, custos de demurrage (ou espera) em armazenamento temporário de contêineres carregados, custos nos portos e os custos de transporte de contêineres vazios. A rede de transporte proposta para o modelo permite múltiplas rotas de de serviço, múltiplas embarcações e múltiplas viagens regulares. Toda a demanda é mensurada em TEUs. O reposicionamento de contêineres cheios do porto de origem ao porto de destino é limitado a três rotas de serviços. Os autores propuseram dois métodos, ambos em duas fases, que utilizaram abordagens de programação inteira combinadas com um métodos em sistemas dinâmicos. A pesquisa sugere que o método baseado no caminho mais curto é preferível para problemas pequenos e o método baseado em regras heurísticas é uma boa alternativa para problemas de larga escala.

Conforme observado na literatura, nenhum dos trabalhos que trataram do problema de alocação de cargas e reposicionamento de vazios consideraram a aplicabilidade dos modelos em decisões operacionais, principalmente em modelo de otimização integrado (BANDEIRA et al., 2009; BROUER et al., 2011; D.-P. SONG & DONG, 2012). É importante observar que o modelo proposto nessa Tese utiliza elementos de modelos propostos na literatura mas apresenta uma nova abordagem na modelagem da rede espaço-tempo para movimentação de contêineres cheios e vazios em conjunto com um modelo de alocação de cargas, permitindo que as decisões dos problemas correlacionados sejam tomadas de modo integrado, adquirindo vantagens no sentido de criar oportunidades de aceitar cargas mais rentáveis em situações onde a demanda excede a capacidade na oferta de contêineres vazios ou nos espaços disponíveis nos navios.

3 MODELO DE ALOCAÇÃO DE CARGAS E REPOSICIONAMENTO DE CONTÊINERES VAZIOS NO TRANSPORTE MARÍTIMO PARA NÍVEL OPERACIONAL DE DECISÃO

Neste capítulo é apresentado o método proposto para alocação de carga e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo, em nível operacional de decisão, no gerenciamento do transporte de contêineres, com base numa rede espaço-tempo multiproduto de fluxo máximo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O transporte de contêineres por via marítima é realizado por navios de carga ou porta-contêineres que possuem capacidades de transporte definidas por módulos (TEUs) em número de posições, por tipo de contêineres e por peso. A companhia de navegação é proprietária dos navios. O carregamento ou o descarregamento de contêineres dos navios pode ocorrer em quaisquer portos, na mesma costa litorânea ou em continentes diferentes. Neste problema foi considerada somente a oferta de serviço de cabotagem por múltiplos navios em múltiplos portos pela companhia de navegação. Os portos considerados são localizados na mesma costa de continente, sem travessia oceânica, como serviço de cabotagem. Em virtude da característica das companhias de navegação baseadas no estudo, o serviço é realizado ao longo da costa brasileira.

Os clientes da companhia de navegação são denominados embarcadores que solicitam o transporte de suas mercadorias pelo serviço de cabotagem ofertado. As mercadorias são unitizadas em contêineres que, no problema considerado, pertencem somente à companhia de navegação. Desse modo, a companhia de navegação disponibiliza um ou mais contêineres vazios ao embarcador que unitiza suas mercadorias antes da realização do embarque. Cabe à companhia de navegação o embarque, o transporte e o desembarque desses contêineres do porto de origem até o porto de destino dentro do horizonte de tempo pré-determinado para a solicitação de transporte.

A companhia de navegação é responsável pela alocação dos contêineres no navio em rota constituída a partir do porto de origem até o porto de destino. É possível, durante o

transporte, o transbordo da carga entre diferentes navios, sendo previamente conhecidas todas essas operações para cada rota.

Em cenários onde a demanda no transporte de contêineres supera a oferta em certos portos dentro do horizonte de planejamento, as companhias de navegação decidem pelo aceite, por modificações na requisição quanto ao caminho de rota que será realizado, ou pela rejeição de uma ou mais requisições de transporte. Além das limitações quanto à oferta de contêineres vazios para o transporte de mercadorias dos embarcadores, há restrições nos navios para o atendimento, bem como quanto ao embarque e o desembarque dos contêineres nos portos de origem e de destino. Neste problema, a carga somente pode ser aceita ou rejeitada em sua totalidade, não havendo possibilidade de aceite parcial da carga definida. Adicionalmente, para operacionalidade do modelo em problemas reais e decisões estratégicas no que diz respeito à viabilidade dos contratos, cargas previamente aceitas, sem possibilidade de rejeição, podem ser definidas para o problema. Desse modo, verifica-se maior flexibilidade na análise de cenários e na constituição de instâncias mais realistas, tal como de solicitações já concretizadas ou em atendimento do horizonte de planejamento anterior.

As companhias de navegação decidem pelo fluxo de carga de acordo com uma margem de contribuição previamente definida para cada requisição de transporte. Assim como definido por von Westarp & Schinas (2016), a margem de contribuição é definida como a diferença entre receitas e custos variáveis, como despesas de movimentação de cargas e de armazenamento. No entanto, quando as companhias de navegação decidem pelo fluxo de cargas de unidades cheias e vazias, a demanda e o custo quando considerado o reposicionamento de vazios para atendimento das solicitações de transporte pelos embarcadores são praticamente desconhecidos. No caso da alocação da rota da carga, a margem de contribuição é variável e depende da rota escolhida.

Também de acordo com von Westarp & Schinas (2016), os custos variáveis totais não podem ser estimados previamente para o problema, tornando a margem de contribuição derivada e incerta. Neste trabalho, será considerada uma margem de contribuição conhecida para cada requisição, variável para cada uma das opções de rota definido para o transporte de um porto de origem a um porto de destino. O principal critério para o aceite total das solicitações é referido à margem de contribuição calculada para cada requisição e para cada opção de rota, deduzidos os custos de embarque, transporte, desembarque e transbordo, bem como outros custos também relacionados.

Ao longo da rede de serviços oferecida para atendimento das solicitações de transporte dos embarcadores, para cada par de origens e destinos, é conhecido um conjunto de uma ou mais opções de rota para o atendimento da solicitação de transporte, na janela de tempo estipulada dentro do horizonte de planejamento. O custo relativo a cada opção de rota varia de acordo com as atividades realizadas e distância percorrida. O embarcador define, no momento da requisição para o transporte, o caminho de rota preferencial. Para cada caminho de rota são conhecidos porto de origem, porto de destino, data de embarque e data de desembarque, além de um ou mais navios que realizam o transporte por este caminho.

É admitido que contêineres de um mesmo embarcador, de uma mesma origem, para um mesmo destino, nas mesmas datas, de um mesmo tipo e tamanho de contêiner, constituem uma mesma carga, de modo a simplificar o processo de planejamento. De tal modo, a “carga” é um conjunto de uma ou mais solicitações de um mesmo embarcador, sujeito a diversos requisitos e atributos comuns que incluem:

- a) Porto de embarque e porto de desembarque dos contêineres correspondentes.
- b) Data inicial para embarque e data final para desembarque dos contêineres, constituindo uma janela de tempo para que todas as atividades de embarque, transporte, transbordo e desembarque ocorram.
- c) Caminho de rota preferencial, sendo previamente conhecidos data de embarque, data de desembarque e um ou mais navios para o transporte dentro da janela de tempo definida.
- d) Número de contêineres de um determinado tipo e tamanho.
- e) Peso bruto total da carga, incluindo taras dos contêineres.
- f) Carga total já aceita para o transporte.
- g) Margem de contribuição, caso a carga seja aceita para o transporte, não considerando custos que variam de acordo com a opção de rota, tais como custos de transbordo que variam por caminho de rota.
- h) Penalidade de mudança de rota, caso a carga seja aceita para o transporte por caminho de rota alternativo.

Havendo disponibilidade de contêineres, o transporte da carga poderá ser realizado, exceto nas situações de indisponibilidade do navio ou de impossibilidade de embarque e desembarque nos portos de origem e de destino. Na situação de inviabilidade do transporte de carga pelo caminho de rota preferencial, a companhia de navegação pode alocar um caminho

de rota alternativo para a carga, desde que haja contêineres vazios disponíveis no porto de origem antes da data do embarque, respeitando a janela de tempo constituída para o transporte.

O transporte de carga é um conjunto de várias operações sequenciadas, sendo essas relativas ao embarque, o transporte marítimo, o transbordo entre embarcações e o desembarque dos contêineres definidos, de um porto e uma data de origem para um porto e uma data de destino inicialmente por um determinado navio. O transbordo entre embarcações é um subconjunto de atividades, que inicia pelo desembarque dos contêineres de um navio, estadia no porto onde é realizado o transbordo e embarque em outro navio. Neste trabalho, é permitido que uma carga seja transportada por mais de um navio para atendimento da solicitação, caso esteja previsto no caminho de rota alocado para a carga.

Embora uma carga se apoie em um conjunto de requisições semelhantes, é possível, a critério do tomador de decisão, definir mais de uma carga que serão equivalentes nas suas definições. Nesse caso, as decisões de aceite ou rejeição de carga, bem como a alocação nas rotas disponíveis do porto de origem ao porto de destino na janela de tempo definida, serão independentes.

Nas situações em que há falta de contêineres vazios para o atendimento de determinada carga no porto de origem a partir da data inicial para o embarque dos contêineres pela companhia de navegação, cujo desembarque não seja possível antes da data final pelas opções de rota disponíveis, a decisão de rejeição da carga poderá se tornar necessária. Desse modo, de maneira integrada, é decidido pela alocação de cargas e o reposicionamento de contêineres vazios, permitindo viabilizar cargas potencialmente mais rentáveis buscando aumentar a margem de contribuição total, deduzidos custos das opções de caminho de rota disponíveis para cada carga e a movimentação de contêineres vazios, levando em conta o resultado econômico com os custos envolvidos.

Neste trabalho é assumido que contêineres vazios somente podem ser transportados nas mesmas embarcações que transportam contêineres cheios, havendo compartilhamento de espaço entre os contêineres cheios e contêineres vazios sem que haja viagens específicas e dedicadas exclusivamente para o reposicionamento de contêineres vazios. Assim, as oportunidades de utilização do espaço para o transporte de contêineres cheios são reduzidas e, conseqüentemente, possibilidades de geração da receita. O tratamento deste problema integrado permite decisões conjuntas entre reposicionamento de contêineres vazios e atendimento de

determinada carga em um porto de origem, de modo a oportunizar o atendimento de uma ou mais cargas de outro porto, sendo esta uma questão importante para o problema de alocação de cargas e reposicionamento de contêineres vazios.

A rejeição de uma carga com maior previsibilidade de atendimento, considerando o aceite de outra carga com maior rentabilidade, aumenta o risco de que uma carga previamente aceita para o transporte não seja realmente atendida pela incerteza contratual e, conseqüentemente, sua contribuição prevista no planejamento não seja considerada na prática. O fator de certeza no atendimento, além das rentabilidades e custos envolvidos, são considerados nas decisões reais de planejamento.

Neste trabalho não serão considerados fatores que envolvem a certeza ou o tempo em comparação às cargas para seleção e alocação para o transporte, visto a complexidade na determinação de tais fatores para a característica estática do modelo proposto.

As margens de contribuição variáveis em relação às opções de caminhos de rota que podem ser alocadas para a carga são consideradas, assim como os custos envolvidos no reposicionamento de vazios.

Semelhante ao modelo proposto por Teixeira & Cunha (2012), são consideradas as principais atividades envolvidas nos ciclos de movimentação de contêineres cheios e vazios.

Neste trabalho, não foram considerados tempos livres para acondicionamento das mercadorias do embarcador nos contêineres antes do embarque e para descarga das mercadorias dos contêineres após o desembarque. Adicionalmente, foram consideradas atividades de transbordo entre diferentes embarcações em um mesmo porto ao longo da rota realizada pela carga.

Conforme Teixeira (2011), “vazio” é definido como o contêiner cujo estado de utilização é vazio; quando vazio e estocado, o mesmo se encontra disponível para o atendimento de determinada carga em um determinado porto. E “cheio” é definido como o contêiner cujo estado de utilização é cheio. O cheio permanecerá indisponível para o atendimento de determinada carga, pois se encontra em atendimento de outra carga.

O ciclo de cheios e vazios, adaptado de Teixeira (2011) é ilustrado na Figura 4 e constituído pelas atividades de embarque, transporte e desembarque de vazios, bem como pelas atividades de embarque, transporte e desembarque de cheios. A atividade de transbordo entre

embarcações ocorre durante o ciclo dos contêineres cheios, sendo realizado, após o primeiro embarque, o transporte, o desembarque e a estocagem dos cheios no porto de transbordo, seguido do embarque, transporte e desembarque na outra embarcação envolvida nesta atividade.

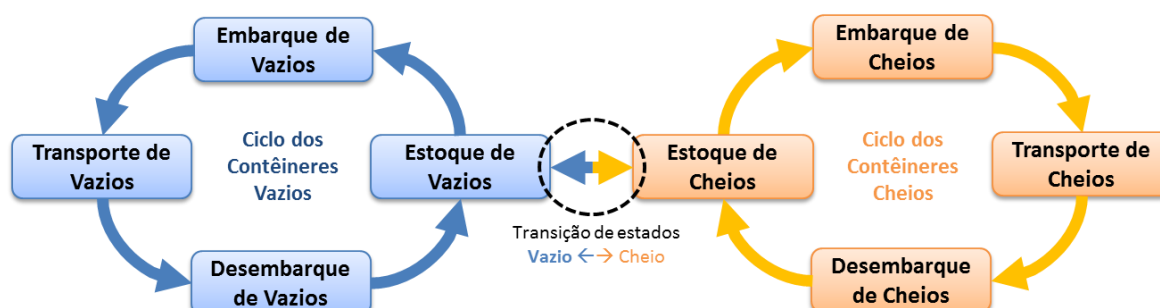


Figura 4 – Ciclo de Contêineres Vazios e Cheios
Fonte: adaptado de TEIXEIRA (2011)

De acordo com Teixeira (2011), o embarque (“*boarding*”) de cheios ou vazios é realizado para o transporte de cargas de cheios, para condução de uma atividade de transbordo ou para reposicionamento de vazios de um porto de origem em uma embarcação que possui escala no referido porto. O transporte (“*transport*”) é realizado com a movimentação de cheios de um porto e uma data para outro porto em data posterior por uma rota de embarcação conhecida. O reposicionamento (“*repositioning*”) é definido como o transporte de vazios realizado nas mesmas características e embarcações que os cheios. O desembarque (“*landing*”) de cheios ou vazios é realizado após o transporte de cargas de cheios ou para condução de uma atividade de transbordo ou para reposicionamento de vazios em um porto por um navio que possui, em sua rota, escala definida no porto de acordo com a programação conhecida.

Em ambos os casos, haverá estocagem (“*inventory*”) de vazios nos portos, bem como a estocagem de cheios durante a condução de uma atividade de transbordo. Na perspectiva de uma companhia de navegação, conforme United (2005), o transbordo (“*transhiping*”) é o movimento de uma carga de contêineres através de um porto intermediário, entre navios porta-contêineres, na rota de um porto de origem para um porto de destino.

As decisões integradas de alocação de cargas e reposicionamento de vazios estão condicionadas às capacidades dos navios para diferentes tipos de contêineres e as disponibilidades de vazios nos portos ao longo do tempo. As decisões envolvidas no problema são inter-relacionadas e sintetizadas a seguir:

- Quais cargas devem ser transportadas e em quais rotas devem ser alocadas para o movimento dos contêineres ao longo da rede serviço, considerando que os contêineres vazios alocados estão disponíveis para unitização e carregamento nos navios?
- Quais os conjuntos de navios definidos para carregar, transportar e descarregar as cargas, incluindo transbordo entre diferentes navios?
- Quantos vazios devem ser reposicionados, qual a origem e o destino dos vazios a serem transportados, e em qual navio os vazios devem ser alocados para o transporte?

3.2 MODELAGEM PROPOSTA

Esta tese aborda um problema de alocação de carga com reposicionamento de vazios, para o planejamento a nível operacional, no gerenciamento das operações de transporte de contêineres. O problema é desenhado como um modelo de fluxo considerando o custo do reposicionamento de contêineres vazios (BROUER et al., 2011; TEIXEIRA & CUNHA, 2012). Na literatura da área de transporte marítimo de serviço regular, a rejeição de carga, em geral, não é considerada, embora desequilíbrios entre oferta e demanda e a capacidade das embarcações possam exigir a rejeição da carga quando não é possível o reposicionamento ou alocação da carga em algum outro caminho de rota disponível.

Este estudo apresenta um problema que permite a rejeição da carga e o reposicionamento de vazios, assim como encontrado na literatura (BROUER et al., 2011; TEIXEIRA & CUNHA, 2012). Conforme Brouer et. al (2011), além da rejeição e reposicionamento de vazios, existe também a alocação de rotas para o transporte das cargas de contêineres cheios. Adicionalmente no modelo proposto nessa Tese, é incorporada a decisão de alocação de cargas em rotas alternativas às rotas previamente definidas pelos embarcadores como preferenciais, de modo a evitar uma possível rejeição de cargas pela falta de capacidade em determinados trechos em vista ao desequilíbrio da rede de serviços, ou mesmo, potencializar a aceitação de cargas mais rentáveis.

Desse modo, para a modelagem do problema apresentado, é proposto um modelo de fluxo em rede multiproduto considerando as atividades relacionadas ao transporte de contêineres cheios e vazios, correlacionando espaço e tempo por meio de uma rede espaço-tempo. Para as decisões de alocação de carga em caminhos de rotas foi adotada uma abordagem

de alocação de caminhos de rota às cargas, onde para cada carga é alocado um caminho de rota para a realização do transporte, priorizando o caminho de rota preferencial na carga que, para o modelo, é o mais rentável das opções de caminhos disponíveis.

Para cada um dos caminhos de rota são envolvidas todas as atividades do ciclo de contêineres cheios, incluindo possíveis atividades de transbordo entre embarcações. Cada combinação de espaço e de tempo definem os nós e os fluxos dos arcos que representam as atividades associadas aos contêineres e seus estados enquanto cheios ou vazios.

O problema tratado é dividido em dois subproblemas:

- a) Alocação de cargas, visando à maximização da margem de contribuição líquida, com dedução de custos oriundos da movimentação de vazios e da escolha da rota para atendimento, considerando restrições de capacidade da frota, portos e disponibilidade de vazios em um período suficientemente necessário para o transporte dos contêineres.
- b) Reposicionamento de vazios de modo a garantir o atendimento das demandas de todos os portos em todas as datas ao longo do horizonte de planejamento de acordo com a alocação de cargas às rotas.

3.2.1 Premissas de modelagem

Na literatura, autores tipicamente mensuram a demanda de contêineres utilizando uma unidade equivalente (TEUs) para reduzir a complexidade do problema (CHOONG et al., 2002; DONG & SONG, 2009; LI et al., 2007; LI, LIU, LEUNG & LAI, 2004). Entretanto, essa mensuração a nível de unidade de contêiner, distinguindo os diferentes tipos e tamanhos de contêineres, é mais alinhada com aplicações reais, principalmente em nível operacional.

Premissa 1 *Depois de descarregar os contêineres cheios e torna-los novamente vazios, os contêineres são enviados a outro porto por meio de reposicionamento ou alocados a outro embarcador para atendimento de outra carga. Transportes por terra não são considerados.*

A não consideração do transporte por terra no modelo é usualmente empregada de modo a tornar o problema mais tratável (CHOONG et al., 2002; DONG & SONG, 2009; LI et al., 2007, 2004) e pode ser extraída de operações na prática. O movimento de contêineres pode ser representado por transporte direto ou transbordos (D. SONG et al., 2005; TEIXEIRA & CUNHA, 2012). Na literatura, os movimentos de vazios podem envolver dois transbordos

devido à sua baixa prioridade (SONG & DONG, 2012) e não permitem paradas em alguns portos para diferentes navios em outras rotas específicas (MENG & WANG, 2011; D. SONG et al., 2005). Entretanto, o modelo proposto não limita o número de eventos de transbordo de contêineres ou paradas em mesmo porto.

Premissa 2 *Não há decisões de modificações da rede de transporte, navios e serviços, que são fixas em todo horizonte de planejamento considerado.*

Companhias de navegação usualmente publicam suas rotas e momentos de parada nos portos na Internet alguns meses antes da viagem (SONG & DONG, 2012). Essa premissa reflete esse fato. Os problemas de rede de transporte e serviços são tipicamente tratados a nível tático-estratégico e são modificados em médio prazo (AGARWAL & ERGUN, 2008). O nível operacional, no qual se contextualiza o problema dessa pesquisa, considera decisões a curto prazo, como o planejamento e realização do transporte, tendo as cargas conhecidas ou confirmadas, não havendo modificações da rede de transporte, dos navios e dos serviços.

Premissa 3 *O horizonte de planejamento é limitado e discreto em períodos fixos.*

Essa premissa é requerida para a aplicação deste problema em uma rede de espaço-tempo fixa (LI et al., 2007, 2004; TEIXEIRA & CUNHA, 2012; ZAMBUZI & CUNHA, 2010). De acordo com a premissa 2, existem limitações da demanda confirmada ao longo do horizonte de planejamento.

As decisões no nível operacional são limitadas no curto prazo. Também é considerado que o horizonte de planejamento é caracterizado por um horizonte rolante de tempo. Então, o horizonte de planejamento é limitado. Os intervalos entre os eventos de parada dos navios nos portos também permitem a discretização do tempo, uma vez que são esses momentos em que o estado entre do contêiner muda de vazio para cheio e vice-versa.

Premissa 4 *A companhia de navegação é proprietária de todos os contêineres usados pela carga para o transporte; atendimento parcial de carga não são possíveis nesse modelo.*

Sobre essa premissa, o modelo unicamente permite contêineres vazios de propriedade da companhia de navegação. Não é significativo contêineres serem de propriedade dos embarcadores. De certo modo, considerar todos os contêineres de propriedade da companhia

de navegação torna o modelo mais restritivo, dado que tanto as decisões de fluxo quanto de alocação de cargas são simultaneamente consideradas.

Premissa 5 *Decisões de determinação de demanda ou suprimento externos de contêineres não são consideradas.*

Essa premissa considera que não é possível decidir pela demanda ou suprimento externos à rede de serviços considerada. Usualmente, essas decisões levam em conta atendimentos a outros portos ou navios que estão fora do escopo do serviço de transporte em decisão.

Considerar essa premissa torna o modelo mais flexível às decisões reais (TEIXEIRA & CUNHA, 2012; ZAMBUZI & CUNHA, 2010). O modelo proposto é desenhado com suprimento conhecido definido como estoques nos portos. De qualquer forma, o modelo é flexível para definir demanda e suprimentos de contêineres adicionais ao longo do horizonte de planejamento.

Premissa 6 *A troca de tipo ou tamanho de contêineres previamente requisitados pelo embarcador para permitir a aceitação da carga não é permitida no modelo.*

Não são consideradas trocas de tamanho e tipo de container, por se tratar de um problema formulado para decisões operacionais e não táticas, onde esse tipo de troca pode ocorrer.

3.3 ELEMENTOS E NOTAÇÕES DO MODELO PROPOSTO

Todas as notações são definidas para apoiar a geração da rede espaço-tempo e formulação do modelo matemático. Inicialmente, são definidos todos os conjuntos dos principais elementos do modelo. O Quadro 2 apresenta os seis conjuntos.

Notação	Descrição
$K = \{1, 2, \dots, k, \dots, K \}$	Conjunto de tipos de contêineres
$T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T \}$	Conjunto de períodos de tempo
$S = \{1, 2, \dots, s, \dots, S \}$	Conjunto de portos (espaços) na rede de serviços
$V = \{1, 2, \dots, v, \dots, V \}$	Conjunto de navios na rede de serviços
$R = \{1, 2, \dots, k, \dots, R \}$	Conjunto de cargas requeridas para o transporte
$P = \{1, 2, \dots, p, \dots, P \}$	Conjunto de caminhos de rota na rede de serviços

Quadro 2 – Conjuntos de elementos principais do modelo

A rede espaço-tempo é baseada em nós e arcos. As notações desses elementos são apresentadas no Quadro 3, para nós, e no Quadro 4, para arcos. Essas definições são necessárias para o desenho da rede fundamental para a resolução no modelo proposto com base em uma rede espaço-tempo.

Notação	Descrição
$N = \{1, 2, \dots, i, \dots, N \}$	Conjunto de nós da rede espaço-tempo
$NSG \in N$	Nó de origem global dos contêineres na rede
$NTG \in N$	Nó de sorvedouro global dos contêineres na rede
$N^{MT} \subset N$	Subconjunto de nós que representam nós marítimos
$N^{IV} \subset N$	Subconjunto de nós que representam nós de estoque

Quadro 3 – Conjunto e subconjuntos de nós da rede espaço-tempo

Notação	Descrição
$A = \{(i, j) i \in N, j \in N\}$	Conjunto de arcos da rede espaço-tempo
$A^{IV} = \{(i, j) i \in N^{IV}, j \in N^{IV}\}$	Subconjunto de arcos para atividade de estoque
$A^{MT} = \{(i, j) i \in N^{MT}, j \in N^{MT}\}$	Subconjunto de arcos para atividade de transporte
$A^{LD} = \{(i, j) i \in N^{IV}, j \in N^{MT}\}$	Subconjunto de arcos para atividade de embarque
$A^{UD} = \{(i, j) i \in N^{MT}, j \in N^{IV}\}$	Subconjunto de arcos para atividade de desembarque
$A^{TS} = \{(i, j) i \in N^{MT}, j \in N^{MT}\}$	Subconjunto de arcos para atividade de transbordo
$A^{AX} = \{(i, j) i \in N^{IV}, j \in N^{IV}\}$	Subconjunto de arcos para auxiliar na rede espaço-tempo

Quadro 4 – Conjunto e subconjuntos de arcos da rede espaço-tempo

Após serem conhecidos todos os conjuntos e subconjuntos de nós e arcos da rede espaço-tempo, é importante definir os atributos associados. O Quadro 5 apresenta todos os atributos comuns para os nós da rede espaço-tempo; o Quadro 6 apresenta todos os atributos comuns para os arcos. Como é possível observar, os atributos dos nós especificam espaço (porto), tempo (período) e navio na rede de serviços. Os atributos de arcos determinam as capacidades para o fluxo de contêineres, bem como o custo unitário de transporte de vazios.

Notação	Descrição
s_i	Porto (espaço) s_i na rede de serviço para todo $i \in N$, não aplicável se $i \in (NSG \cup NTG)$
t_i	Período t_i no horizonte de planejamento para todo $i \in N$, não aplicável se $i \in (NSG \cup NTG)$
v_i	Navio $v_i \in V$ na rede de serviços para todo $i \in N^{MT}$
$d_{i,k}$	Demanda ou suprimento de contêiner $d_{i,k}$ de tipo $k \in K$ e $i \in N$, exceto quando $i \in N^{MT}$

Quadro 5 – Atributos dos nós da rede espaço-tempo

Notação	Descrição
$u_{ij,k}$	Máxima capacidade do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de $u_{ij,k}$ unidades de contêineres do tipo $k \in K$
U_{ij}	Máxima capacidade do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de U_{ij} TEUs de qualquer tipo de contêiner
$z_{ij,k}$	Máxima capacidade do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de z_{ij} unidades de vazios do tipo $k \in K$
Z_{ij}	Máxima capacidade do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de Z_{ij} TEUs de vazios de qualquer tipo de contêiner
Ω_{ij}	Máxima capacidade do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de qualquer contêiner limitado a Ω_{ij} toneladas
$l_{ij,k}$	Mínimo fluxo $l_{ij,k}$ no arco $(i, j) \in A$ de contêineres do tipo $k \in K$ requeridos no arco $(i, j) \in A$
$C_{ij,k}$	Custo unitário $C_{ij,k}$ do arco $(i, j) \in A$ para o fluxo de vazios do tipo $k \in K$

Quadro 6 – Atributos dos arcos da rede espaço-tempo

Para cada tipo de contêiner são conhecidas duas propriedades, conforme Quadro 7. Essas propriedades são as únicas que diferenciam os tipos de contêineres no modelo para a dimensão tamanho, definida pela quantidade equivalente em TEUs, e para a dimensão peso, definida pela tara (peso total do contêiner quando vazio).

Notação	Descrição
α_k	Quantidade equivalente α_k , em TEUs, para um contêiner no tipo $k \in K$
β_k	Tara β_k , em toneladas, de contêineres do tipo $k \in K$.

Quadro 7 – Parâmetros para os tipos de contêineres

O Quadro 8 apresenta os parâmetros da carga, conforme previamente definido. Para cada carga são conhecidos os portos de origem e de destino, o período inicial e final para o transporte da carga, a quantidade demandada para um determinado tipo de contêiner e o peso bruto da carga. No Quadro 9, são apresentados o conjunto de caminhos de rota disponíveis para cada carga e a margem de contribuição para cada caminho caso a carga seja alocada, bem como o caminho de rota preferencial para o transporte.

Notação	Descrição
si_r	Porto de origem si_r da carga $r \in R$
sf_r	Porto de destino sf_r da carga $r \in R$
ti_r	Período inicial ti_r para transporte da carga $r \in R$
tf_r	Período final tf_r para transporte da carga $r \in R$
k_r	Tipo de contêiner $k_r \in K$ da carga $r \in R$
q_r	Demanda q_r de carga $r \in R$ do tipo de contêiner $k_r \in K$
ω_r	Peso bruto da carga $r \in R$ considerando a tara dos contêineres e peso dos produtos

Quadro 8 – Parâmetros para cargas

Notação	Descrição
$g_{p,r}$	Margem de contribuição unitária $g_{p,r}$ da carga $r \in R$ quando aceita para o caminho de rota $p \in P_p$
$P_r \subseteq P$	Subconjunto de caminhos de rota disponíveis para transportar a carga $r \in R$
δ_r	Caminho de rota $\delta_r \in P_r$ escolhido pelo embarcador para transportar a sua carga $r \in R$
ϕ^G	Percentual de penalidade sobre a margem bruta para realocação de rota alternativa
ϕ^A	Percentual de penalidade sobre períodos de atraso da rota alternativa sobre a rota preferencial

Quadro 9 – Parâmetros para caminhos de rotas associados a cada carga

Os caminhos de rota são elementos principais do modelo e seus parâmetros são apresentados no Quadro 10. Os caminhos de rota são definidos como uma dupla de arcos inter-relacionados e consecutivos.

Notação	Descrição
$F_p = \langle (i, j) \in A \rangle$	Dupla de arcos $(i, j) \in A$ inter-relacionados para fluxo pelo caminho de rota $p \in P$
psi_p	Porto de origem $psi_p \in S$ de rota $p \in P$ referente ao nó inicial do primeiro elemento de F_p
psf_p	Porto de destino $psf_p \in S$ da rota $p \in P$ referente ao nó final do último elemento de F_p
pti_p	Período inicial $pti_p \in T$ da rota $p \in P$ referente ao nó inicial do primeiro elemento de F_p
ptf_p	Período final $ptf_p \in T$ da rota $p \in P$ referente ao nó final do último elemento de F_p
c_p	Custo unitário para transportar cheios pelo caminho de rota $p \in P$

Quadro 10 – Parâmetros para caminhos de rota

Alguns parâmetros foram utilizados para auxiliar na geração das instâncias e são úteis em algumas decisões de capacidade. O Quadro 11 apresenta esses parâmetros.

Notação	Descrição
ψ	Percentual de contêineres vazios disponíveis nos portos para atendimento das suas demandas
χ	Percentual de estoque final necessário em cada portos com base na demanda planejada atual

Quadro 11 – Parâmetros para auxílio na geração das instâncias

Por fim, o Quadro 12 apresenta as variáveis de decisão do modelo; as variáveis binárias auxiliam na decisão de alocação de cargas aos caminhos de rota e as variáveis contínuas no fluxo de cheios e vazios pela rede espaço-tempo. Considerando que os atributos de capacidade e custos do modelo são todos inteiros e o modelo desenhado como um problema de fluxo-máximo de rede, não é necessário definir as variáveis de fluxo de cheios e vazios como variáveis inteiras, reduzindo a necessidade de recurso computacional.

Notação	Descrição
$Y_{p,r}$	Variável binária onde 1 representa que a carga $r \in R$ foi alocada para a rota $p \in P$.
$X_{ij,k}$	Variável contínua que define o fluxo de cheios do tipo $k \in K$ no arco $(i, j) \in A$
$V_{ij,k}$	Variável contínua que define o fluxo de vazios do tipo $k \in K$ no arco $(i, j) \in A$

Quadro 12 – Variáveis de decisão do modelo matemático

3.4 REPRESENTAÇÃO DA REDE

A rede espaço-tempo $G(N, A)$ é composta principalmente de nós de estoque, nós marítimos e arcos A que representam as atividades de estoque, embarque, transporte, transbordo e desembarque de contêineres. Para cada porto $s \in S$ são considerados arcos $(NSG, j) \in A^{AX}$ representando o primeiro fluxo de estoque e $(i, NTG) \in A^{AX}$ representando o último fluxo, onde $t_j = 1$ e $t_i = |T|$.

3.4.1 Nós de origem e sorvedouros globais

Para a estrutura de início e fim da rede, são considerados o nó de origem global NSG e o nó de sorvedouro global NTG para o modelo de fluxo-máximo. Todos demais nós $i \notin (NSG \cup NTG)$, quando o atributo $d_{i,k} = 0$ para todo $k \in K$, são utilizados para o transbordo de contêineres na rede, e permitem a movimentação no espaço e tempo.

Quando $d_{i,k} > 0$, aplicado principalmente ao nó NSG, o nó possui oferta de contêineres. E, quando $d_{i,k} < 0$, aplicado principalmente ao nó NTG, o nó possui demanda de contêineres. A equação (6) e (7) definem a demanda no NSG e a oferta no NTG.

$$d_{NSG,k} = \sum_{(NSG,j) \in A^{AX}} l_{ij,k} \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$d_{NTG,k} = - \sum_{i \in N} d_{k,i} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

3.4.2 Atividades de Estoque nos Portos

A fonte global de contêineres vazios na rede espaço-tempo ocorre pelo nó $NSG \in N$, que distribui contêineres para cada porto $p \in P$ pelo arco $(NSG,j) \in A^{AX}$ restrito pelo atributo $l_{ij,k} > 0$, onde $i = NSG$, representando um estoque inicial de contêineres para cada porto por cada tipo de contêiner.

No final da rede espaço-tempo, o último estoque de cada porto $p \in P$ segue para o nó $NTG \in N$, nó de sorvedouro global com a demanda de contêineres para cada tipo. O estoque final esperado para cada porto $s_i \in S$ é definido pelo atributo $l_{ij,k} > 0$, onde $j = NTG$; normalmente $l_{ij,k} = 0$, onde $j = NTG$.

O arco de estoque $(i,j) \in A^{IV}$ representa o estoque entre dois nós $i \in N^{IV}$ e $j \in N^{IV}$, onde $p_i = p_j$ e $t_j = t_i - 1$. A Figura 5 ilustra um exemplo de rede espaço-tempo onde o nó NSG representa o nó de fonte global e o nó NTG representa o nó de sorvedouro global. Os nós 1-8 representam os nós de estoque, onde 1-4 é relacionado ao porto $s1$ e 5-8 relacionado ao porto $s2$. Os arcos com origem no NSG representam o fluxo de estoque inicial e os arcos com destino no NTG representam o fluxo de estoque final.

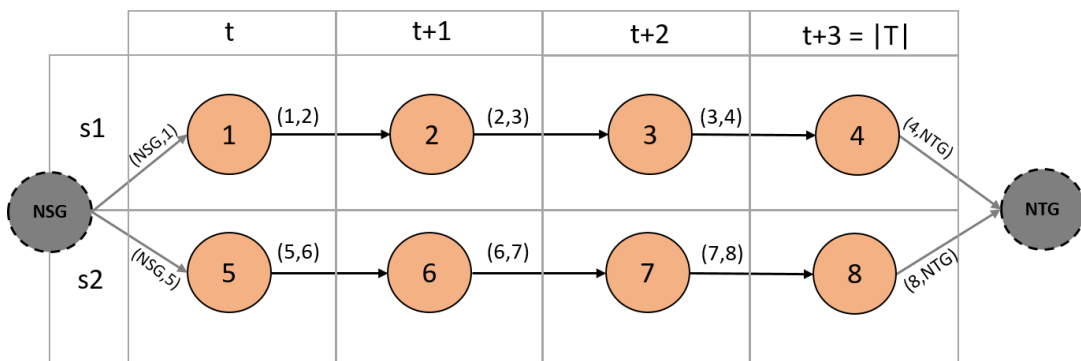


Figura 5 – Nós e arcos de estoque com nós de fonte e sorvedouro globais

3.4.3 Atividades de Transporte Marítimo

O nó marítimo $i \in N^{MT}$ é relacionado ao navio $v_i \in V$, ao período de tempo $t_i \in S$ e ao porto $s_i \in S$. Uma sequência ordinal de nós define a rota de serviço de um navio $v \in V$, onde $v_i = v_j$ e $t_i < t_j$ considerando um par de nós sucessivos $i \in N^{MT}$ e $j \in N^{MT}$. Por sua vez, o arco marítimo $(i, j) \in A^{MT}$ representa a atividade de transporte de contêineres entre portos marítimos $i \in N^{MT}$ e $j \in N^{MT}$. Cada arco $(i, j) \in A^{MT}$ contém os parâmetros de capacidades e custos de contêineres transportados em um navio $v_i \in V$.

A Figura 6 ilustra os nós e arcos marítimos, onde nós 9-12 representam nós marítimos para um navio e nós 13-15 representam nós marítimos para outro navio. Os arcos que interligam esses nós compõem a rota de serviço para cada um dos navios.

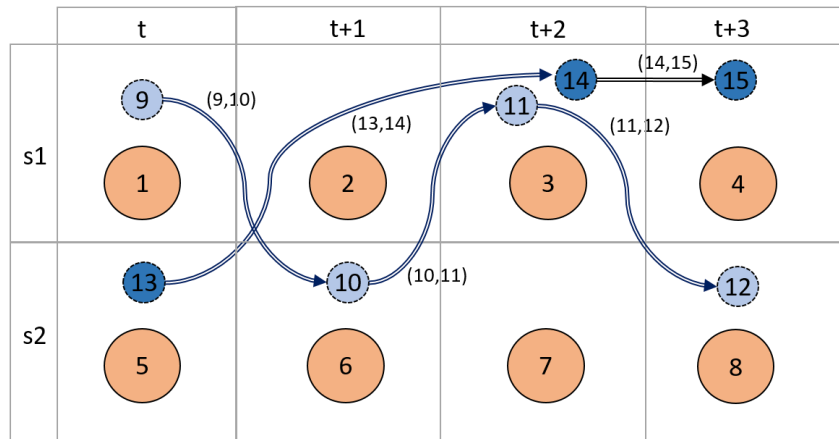


Figura 6 – Nós e arcos marítimos na rede espaço-tempo

3.4.4 Atividades de Embarque e Desembarque

O arco de embarque $(i, j) \in A^{LD}$ originado de um nó de estoque $i \in N^{IV}$ e destinado a um nó marítimo $j \in N^{MT}$, onde $s_i = s_j$ e $t_i = t_j$, representa uma atividade de embarque. De modo similar, um arco de desembarque $(i, j) \in A^{UD}$ originado de um nó marítimo $i \in N^{MT}$ e destinado a um nó de estoque $j \in N^{IV}$, onde $s_i = s_j$ e $t_i = t_j$, representa uma atividade de desembarque.

A Figura 7 ilustra os arcos de embarque, de um nó de estoque para um nó marítimo, e os arcos de desembarque, de um nó marítimo para um nó de estoque. Nesse exemplo, os nós de estoque são numerados de 1 a 8 e os nós marítimos numerados de 9 a 15.

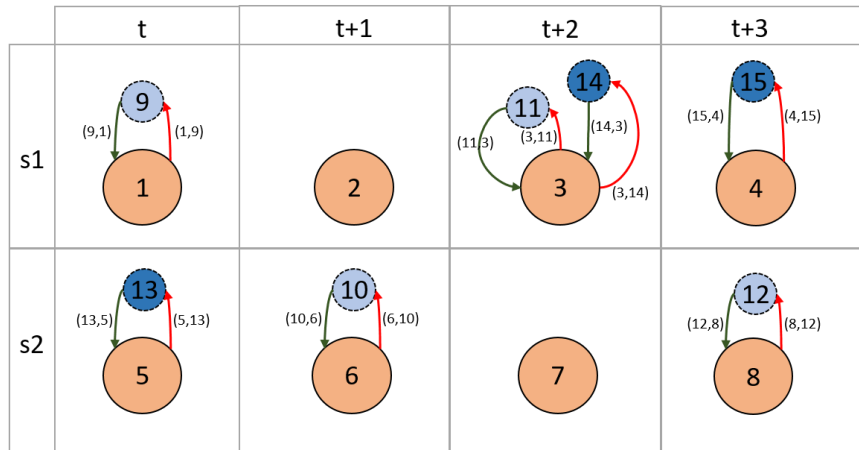


Figura 7 – Arcos de embarque e de desembarque na rede espaço-tempo.

3.4.5 Atividades de Transbordo

O arco de transbordo $(i, j) \in A^{TS}$ representa a atividade de transbordo entre dois navios em um mesmo porto para transbordo, definido na rede por dois nós marítimos, considerando um nó de origem $i \in N^{MT}$ e um nó de destino $j \in N^{MT}$ onde $p_i \neq p_j$ e $t_i \geq t_j$.

A Figura 8 ilustra os arcos de transbordo interligados a dois nós marítimos de navios diferentes, de modo que o nó de destino seja em período igual ou posterior ao nó de origem.

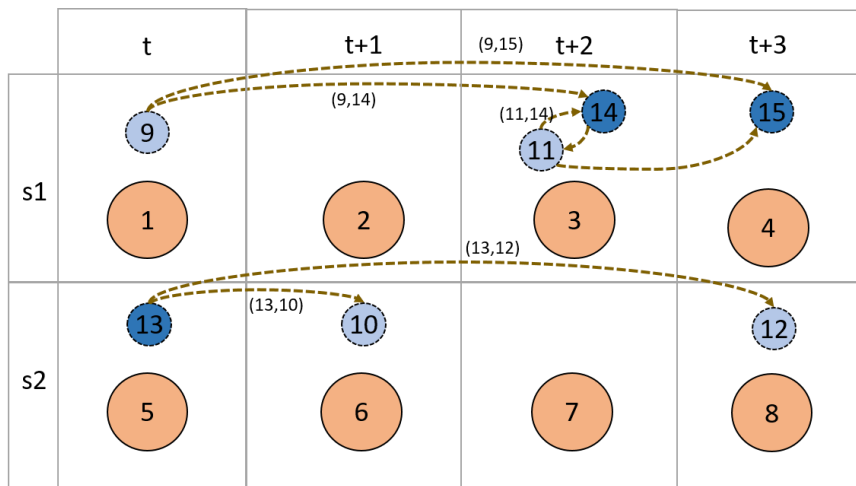


Figura 8 – Arcos de transbordo na rede espaço-tempo

3.4.6 Caminhos de rota para transporte de cargas

Uma dupla de arcos inter-relacionados, onde $(i, j) \in A$, representa um caminho de rota $p \in P$, onde arcos subsequentes $(i, j) \in F_p$ e $(i', j') \in F_p$ são definidos por $j = i'$. O primeiro arco da dupla inicia o fluxo no caminho de rota e o último arco da dupla finaliza o fluxo. Para

cada carga $r \in R$ é conhecido um subconjunto de caminhos de rota $P_r \subseteq P$ disponíveis e viáveis para executar o transporte.

É importante salientar que somente um caminho de rota é escolhido para transportar toda a carga. Desse modo, variáveis de decisões binárias são definidas como $Y_{p,r} = \{0,1\}$, determinando se o caminho de rota $p \in P_r$ é escolhido para transportar a carga $r \in R$. Então, as restrições relacionadas a essas variáveis determinam o fluxo de contêineres cheios na rede espaço-tempo.

A Figura 9 ilustra caminhos de rota para um exemplo pequeno de rede espaço-tempo, desconsiderando os arcos de estoque, bem como os nós NSG e NTG. Todos os arcos candidatos para compor um caminho de rota estão representados na rede espaço-tempo, conforme Figura 9-a.

Existem duas alternativas de caminho de rota, $p1$ e $p2$, para transportar cargas do porto $s1$ para o porto $s2$, conforme Figura 9-b. Na Figura 9-c, um caminho de rota $p3$ é ilustrado considerando o transbordo entre dois navios diferentes em período $t+2$ para transportar a carga do porto $s3$ para o porto $s2$. A Figura 9-d ilustra um caminho de rota $p4$ para transportar carga do porto $s1$ e $s3$.

A equação (8) representa a margem de contribuição para cada carga e caminho de rota preferencial δ_r (escolhido pelo embarcador) ou para caminho de rota alternativo $p \in P_r | p \neq \delta_r$, já levando em consideração os custos associados ao caminho e margem unitária.

No caminho de rota alternativo existe uma penalidade definida pela expressão $\phi^G + \phi^P(ptf_p - pti_p)$, onde $\phi^G < 1$ que representa um percentual de desconto sobre a margem de contribuição unitária gu_r em caso de transporte da carga não ser realizado pelo caminho de rota preferencial. Para cada dia de atraso na entrega em relação à rota preferencial, definido por $ptf_p - pti_p$, há uma penalidade definida por ϕ^P .

A penalidade total é descontada da margem de contribuição para caminhos de rota alternativos. Apesar do modelo ser desenhado para um problema de alocação de cargas, essas penalidades garantem que, em um primeiro momento, seja mais vantajoso alocar as cargas em suas rotas preferenciais e, em caso de falta de capacidade para atendimento na rota preferencial, sejam priorizadas rotas alternativas com entrega mais cedo, ou seja, mais próximas do caminho de rota preferencial.

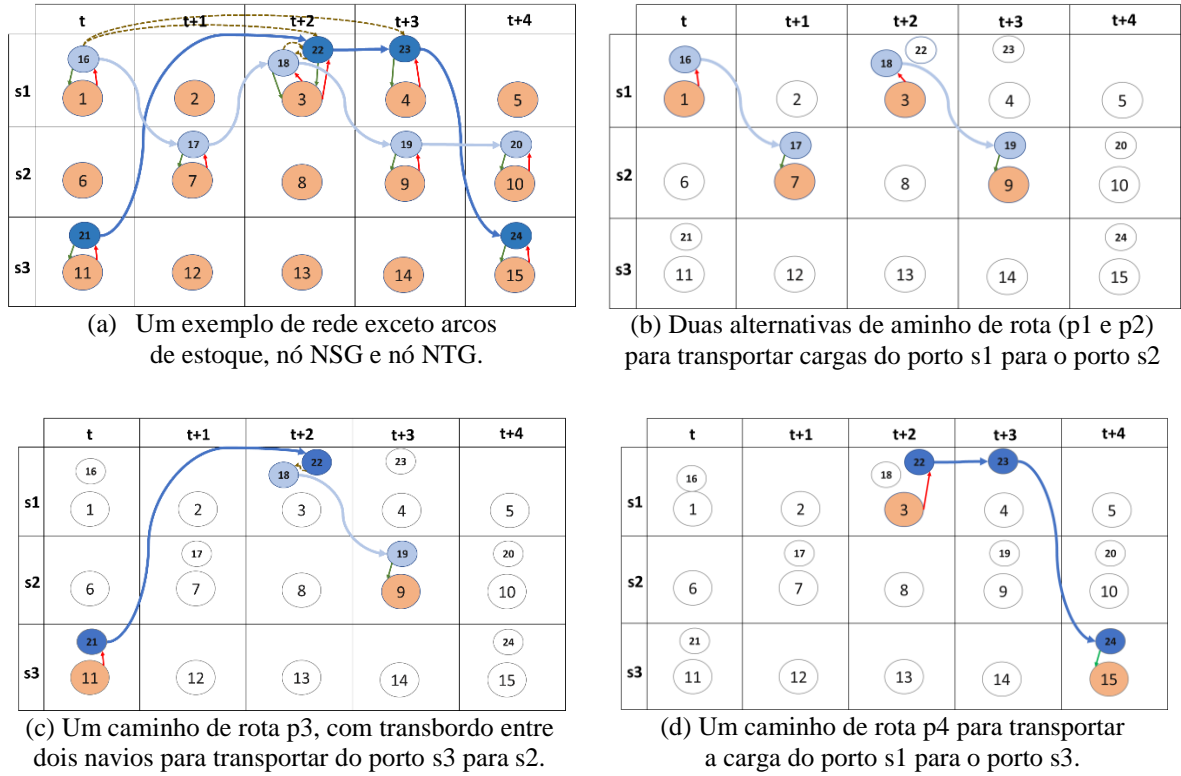


Figura 9 – Exemplos de caminhos de rota na rede espaço-tempo

$$g_{p,r} = \begin{cases} gu_r \times \sum_{k \in K} q_r - c_p \quad \forall r \in R, p = \delta_r \\ \left[1 - \phi^G - \phi^P (ptf_p - pti_p) \right] gu_r \times \sum_{k \in K} q_r - c_p \quad \forall r \in R, p \in P_r | p \neq \delta_r \end{cases} \quad (8)$$

3.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nessa subseção é explicada toda a formulação matemática do modelo proposto. Inicialmente, as equações e inequações de (9) a (19) apresentaram o modelo completo. Na sequência, é realizada a explicação de cada parte da formulação.

$$\max Z = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} (g_{p,r} \times Y_{p,r}) - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (c_{ij}^k \times V_{ij}^k) \quad (9)$$

Sujeito a

$$\sum_{r \in R | k=k_r} \left(q_r \sum_{p \in P_r | (i,j) \in P} Y_{p,r} \right) = X_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (10)$$

$$X_{ij}^k + V_{ij}^k \leq u_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (11)$$

$$V_{ij}^k \leq z_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} [\alpha^k \times (X_{ij}^k + V_{ij}^k)] \leq U_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} [\alpha^k \times V_{ij}^k] \leq Z_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (14)$$

$$\sum_{r \in R} \left(\omega_r \sum_{p \in P_r} \sum_{(i, j) \in F_p} Y_{p,r} \right) + \sum_{k \in K} (\beta^k \times V_{ij}^k) \leq \Omega_{ij} \quad \forall (i, j) \in A^{MT} \quad (15)$$

$$V_{ij}^k \geq l_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A - A^{TS}, k \in K \quad (16)$$

$$V_{ij}^k = 0 \quad \forall (i, j) \in A^{TS}, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{(i, j) \in A} (X_{ij}^k + V_{ij}^k) - \sum_{(j, i) \in A} (V_{ji}^k + X_{ji}^k) = d_i^k \quad \forall i \in N, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P_r} Y_{p,r} \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (19)$$

Função Objetivo: Maximização da margem de contribuição

A função objetivo definida na equação (20) busca a maximização da margem de contribuição total no horizonte finito, deduzidos os custos de operação. É conhecida uma margem de contribuição $g_{p,r}$ para cada carga $r \in R$ se o caminho de rota $p \in P_r$ é alocado para transportar a carga. Essa margem de contribuição pode ser calculada conforme equação (8), para caminhos de rota preferenciais, e conforme equação (20), para caminhos de rota alternativos. O reposicionamento de contêineres vazios ocasiona custos unitários c_{ij}^k para carregar, descarregar e transportar contêineres pelos navios. As variáveis V_{ij}^k determinam o fluxo de vazios em cada arco $(i, j) \in A$, para cada tipo de contêiner $k \in K$.

$$\max Z = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} (g_{p,r} \times Y_{p,r}) - \sum_{k \in K} \sum_{(i, j) \in A} (c_{ij}^k \times V_{ij}^k) \quad (20)$$

As restrições do modelo são definidas para determinação do fluxo de cheios, capacidades de fluxo em unidades, em TEU e em peso, e equacionamento do fluxo em rede, bem como outras restrições. A seguir, são apresentados os grupos de restrições.

Determinação do fluxo de cheios nos arcos

As variáveis X_{ij}^k , na restrição (21), são relacionadas a cada arco $(i, j) \in A$ e determinam o fluxo de cheios para o transporte de carga. Adicionalmente, as variáveis $Y_{p,r}$ determinam a quantidade de contêineres q_r vazios necessários baseado na alocação da carga. Desse modo, quando uma carga é alocada para o transporte, o fluxo de cheios para o arco é determinado.

$$\sum_{r \in R | k=k_r} \left(q_r \sum_{p \in P_r | (i,j) \in P} Y_{p,r} \right) = X_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (21)$$

Capacidades de contêineres cheios ou vazios, em unidades e em TEU

As restrições de (22) a (26) são usualmente mais aplicadas aos arcos marítimos e consideram a capacidade máxima do arco $(i, j) \in A$ para fluxo de contêiner na rede espaço-tempo. As restrições (22) e (23) restringem o fluxo por tipo de contêiner $k \in K$, enquanto as restrições (24) e (25) restringem o fluxo em TEU. As restrições (23) e (25) consideram somente restrição de capacidade no fluxo de vazios.

$$X_{ij}^k + V_{ij}^k \leq u_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (22)$$

$$V_{ij}^k \leq z_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K} [\alpha^k \times (X_{ij}^k + V_{ij}^k)] \leq U_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} [\alpha^k \times V_{ij}^k] \leq Z_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (25)$$

Capacidades máxima, em peso

A restrição (26) considera uma capacidade máxima, em peso, no arco $(i, j) \in A$ para o fluxo de contêineres considerando o atributo ω_r relacionado a cada carga $r \in R$, bem como a tara dos vazios β_k do tipo $k \in K$. Para cheios, o atributo ω_r já considera a tara.

$$\sum_{r \in R} \left(\omega_r \sum_{p \in P_r} \sum_{(i,j) \in F_p} Y_{p,r} \right) + \sum_{k \in K} (\beta^k \times V_{ij}^k) \leq \Omega_{ij} \quad \forall (i, j) \in A^{MT} \quad (26)$$

Fluxo nulo ou mínimo de contêineres

Um limite inferior nos arcos $(i, j) \in A$ para contêineres vazios e que determina um fluxo mínimo de vazios é definido pela restrição (27), tipicamente aplicado nos arcos auxiliares interligados ao nó NSG de modo a determinar o estoque inicial de contêineres em cada porto $p \in P$, bem como interligados ao nó NTG de modo a determinar o estoque final mínimo de contêineres em cada porto $p \in P$.

Adicionalmente, não é permitido fluxo de vazios, conforme restrição (28), nos arcos de transbordo, específicos para caracterizar o transbordo de contêineres cheios na rede. O transbordo de vazios durante um reposicionamento, se necessário, irá ocorrer naturalmente na rede pelos arcos de embarque, transporte e desembarque, bem como arcos de estoque.

$$V_{ij}^k \geq l_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A - A^{TS}, k \in K \quad (27)$$

$$V_{ij}^k = 0 \quad \forall (i, j) \in A^{TS}, k \in K \quad (28)$$

Equação de Fluxo em Rede

A restrição (29) determina o balanceamento de fluxo de contêineres na rede espaço-tempo com base numa demanda d_i^k para cada nó $i \in N$ e cada tipo de contêiner $k \in K$. Assumindo que somente a restrição (21) determina o fluxo de cheios nos arcos relacionados ao caminho de rota alocado para a carga, o fluxo de vazios é determinado pela restrição (29) que é fortemente condicionada às decisões de alocação de cargas.

Quando um fluxo de cheios é determinado com base na alocação de um caminho de rota para a carga, o fluxo de vazios é diretamente afetado de modo a garantir o balanceamento dos contêineres. Dessa forma, a alocação de vazios para as cargas é realizada através das mudanças de estado entre contêineres cheios e vazios, bem como ao contrário. Apesar de tudo, somente é possível alocar cargas em caminhos de rota e, posteriormente, alocar vazios para as cargas se a restrição (29) for satisfeita, bem como as demais restrições de capacidade.

$$\sum_{(i,j) \in A} (X_{ij}^k + V_{ij}^k) - \sum_{(j,i) \in A} (V_{ji}^k + X_{ji}^k) = d_i^k \quad \forall i \in N, k \in K \quad (29)$$

Rota única para cada carga

Cada carga somente pode ser alocada para um único caminho de rota, dado que, para o modelo proposto, as cargas são indivisíveis. Desse modo, a restrição (30) garante essa condição.

$$\sum_{p \in P_r} Y_{p,r} \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (30)$$

Limitantes das variáveis

Finalmente, as restrições (31) e (32) determinam as variáveis de decisão para alocação de cargas aos caminhos de rota $Y_{p,r}$ como binárias e as variáveis de decisão de fluxo $X_{ij,k}$ e $V_{ij,k}$ como positivas e contínuas.

$$Y_{p,r} = \{0,1\} \quad \forall p \in P_r, r \in R \quad (31)$$

$$X_{ij}^k, V_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (32)$$

3.6 MÉTODO DE EXECUÇÃO E VALIDAÇÃO

O procedimento para resolução da instância do problema referente ao modelo proposto é ilustrado na Figura 10, com o fluxo de atividades que são realizadas para resolver cada instância do modelo. A interface com o usuário auxilia, basicamente, na entrada dos dados e na interpretação dos resultados. A aplicação em Python é responsável por importar os dados, criar a rede espaço-tempo, enumerar as rotas, associar rotas com cargas, gerar modelo, otimizar

modelo e exportar resultados da otimização. A aplicação utiliza uma biblioteca para realizar a otimização via pacote de otimização Gurobi (GUROBI, 2013)

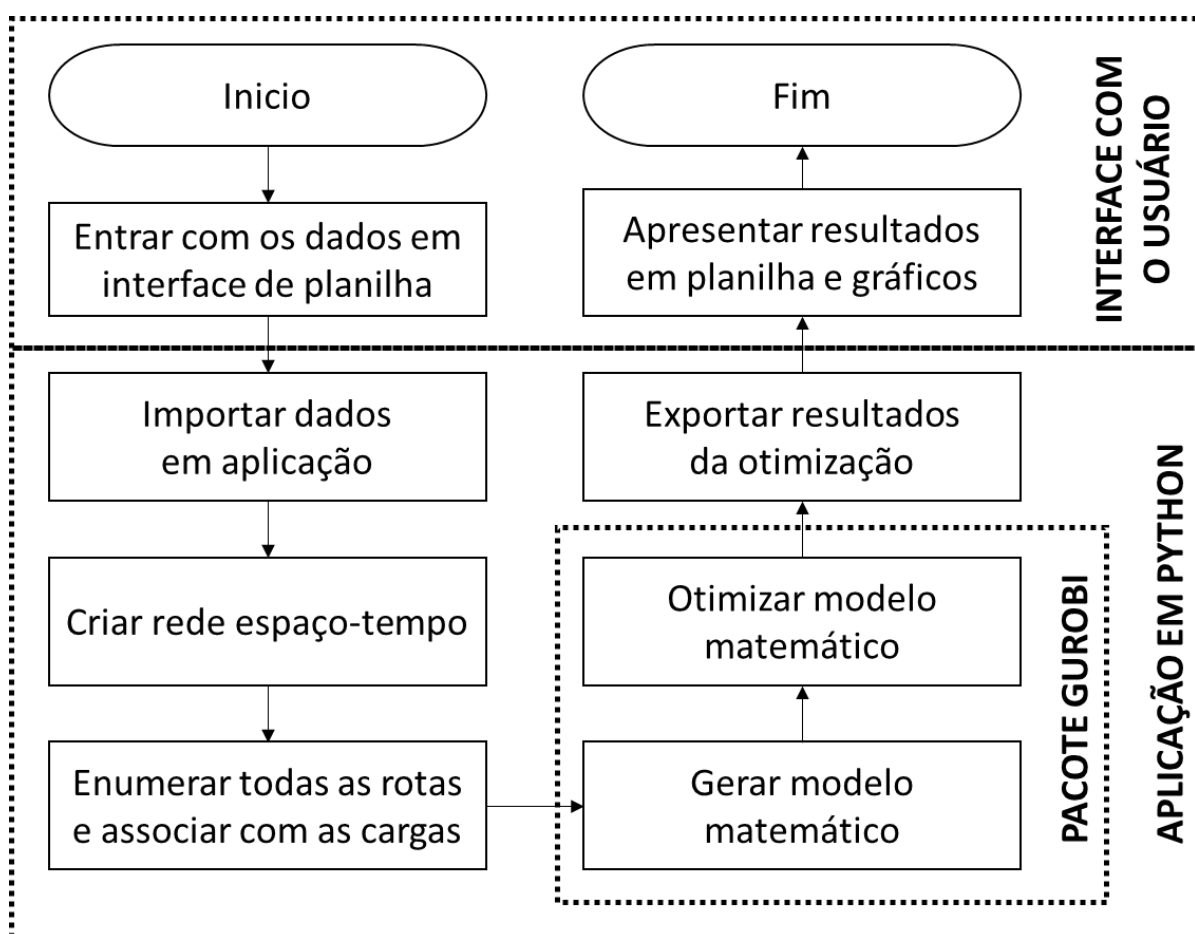


Figura 10 – Método de otimização proposto

A entrada de dados em interface de planilha e a apresentação dos resultados em planilha em gráficos são as atividades principais da interface com o usuário. Uma interface intuitiva e de fácil operacionalização, que não demande conhecimentos específicos de modelagem matemática em pesquisa operacional para resolução do problema proposto foi, como objetivo secundário, definida. Esta necessidade corrobora com uma das contribuições da tese no que diz respeito à proposta de uma sistemática de apoio à decisão para companhias de navegação elevarem o grau de qualidade dos seus serviços, bem como uma redução dos custos com a melhor aplicação de seus recursos.

A aplicação em Python contém os procedimentos de manipulação dos dados durante a execução. A aplicação inicia o procedimento com a importação dos dados da interface e organiza os dados em memória, permitindo uma fácil busca das informações para construção da rede espaço-tempo.

A rede espaço-tempo é construída de modo que todas as atividades necessárias sejam contempladas para o gerenciamento no transporte de contêineres. Esta rede utiliza tipos de entidades específicas no modelo de dados. Todos os dados de custo e capacidade são convertidos em atributos de arcos e as informações básicas de estoque são dispostas nos respectivos arcos e nós.

Para cada demanda de transporte de cargas, são definidos os possíveis caminhos de rota alternativos, bem como conhecidos os caminhos de rota preferenciais já definidos pelos embarcadores. De posse dessa informação e da rede espaço-tempo, é possível associar os arcos da rede aos caminhos de rota para cada carga, de modo que a rede detenha essa informação para posterior modelagem matemática.

O modelo matemático, tendo a rede espaço-tempo e os caminhos de rota para cada carga concatenados em entidades na memória, é implementado com auxílio de uma biblioteca específica do pacote de otimização Gurobi. Todas as variáveis e restrições são construídas para resolver, especificamente, o problema em rede de fluxo-máximo, sendo consideradas variáveis binárias de decisão para a escolha do caminho de rota referente à carga selecionada para alocação. Uma vez finalizada a otimização, dados os critérios de parada definidos, os resultados da rede espaço-tempo são exportados e interpretados ainda na aplicação Python e dispostos na interface do usuário para apresentação de gráficos e tabelas de resultados analíticos.

A verificação e validação são procedimentos essenciais para demonstrar que o modelo é operacional, ou seja, que tem condições de resolver o problema proposto, fornecendo informações confiáveis, completas e em tempo computacional adequado para a tomada de decisão ao qual é proposto. Para a verificação do modelo proposto, é executada uma instância de pequeno porte, permitindo testes pontuais nos procedimentos para sua resolução. Esta instância possui tamanho suficiente para ser resolvida com e sem apoio computacional. Dessa forma, é garantido o entendimento do modelo e o domínio de seus procedimentos, bem como da rede e do modelo matemático associado. Uma vez que o modelo está verificado e com êxito, é realizado procedimento de validação. Para a sistemática proposta nessa pesquisa, é proposto esse procedimento por meio da análise de diversos conjuntos de instâncias de vários portes, condizentes com o que ocorre na prática em gerenciamento de transporte de contêineres na visão das companhias de navegação.

Para geração das instâncias para validação do modelo, foram observados diversos dados e informações acerca das práticas e conduzida a formulação das instâncias com a definição de um cenário fixo com portos, navios e rotas. De tal forma, representa-se apropriadamente uma topologia de rede de serviços fixa em virtude do nível de decisão operacional considerado, sorteando cargas de acordo com um perfil de demanda realista e desequilibrado em relação à oferta e demanda de contêineres.

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O modelo matemático proposto nesta pesquisa é parte integrante de um sistema de suporte à decisão (SSD) que permite a sua utilização de forma mais intuitiva. A Figura 11 apresenta os principais componentes e suas relações diretas para a operacionalização do SSD.

Os analistas têm acesso à diversas interfaces para realizar operações no sistema para auxiliar na tomada de decisão, sendo todas desenvolvidas em planilha Microsoft Excel. A planilha possui interface direta com a aplicação implementada em Python. A aplicação em Python utiliza uma biblioteca de pacote de otimização Gurobi, que tem por objetivo otimizar a rede espaço-tempo construída a partir da aplicação por meio das informações fornecidas pelo usuário via planilha. O usuário gerencia as instâncias em um repositório de arquivos.

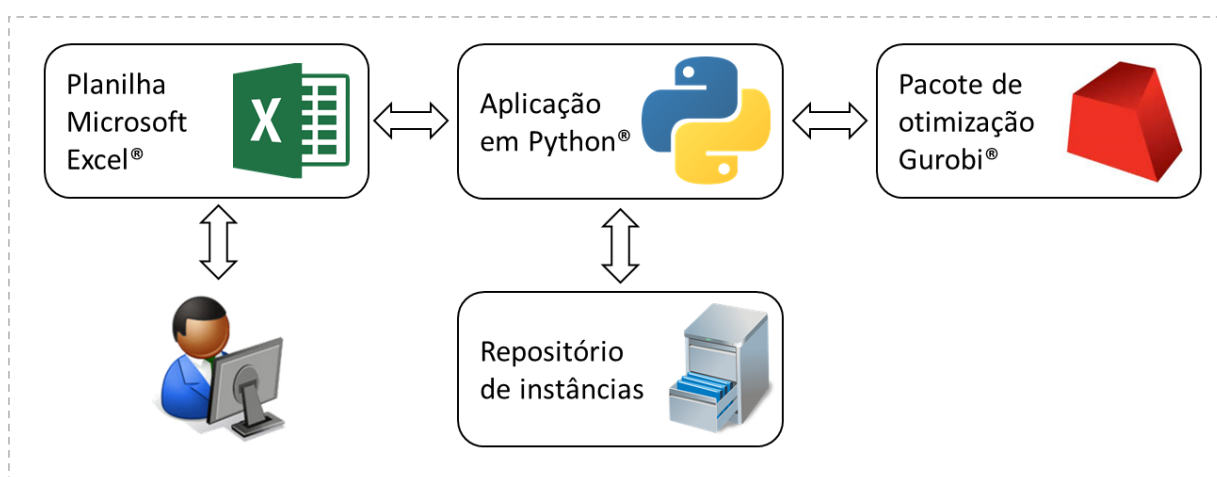


Figura 11 – Relação dos principais componentes do SSD

4.2 MODELO DE DADOS

4.2.1 Modelo de dados de entrada

O SSD proposto é desenvolvido com base em um modelo de dados que permite a implementação das informações no sistema de maneira adequada. Todas as entidades podem ser definidas como objetos dentro do sistema de um determinado tipo. O modelo de dados de entrada é composto por diversos tipos de entidades, sendo considerados objetos de dados, conforme ilustrado na Figura 12.

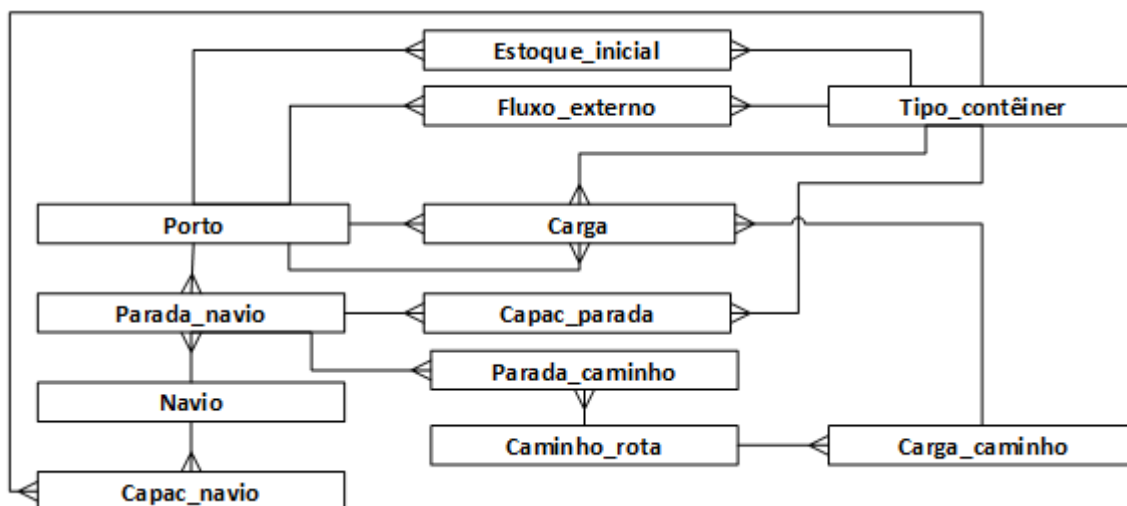


Figura 12 – Visão macro das entidades de entrada de dados e suas relações

Os tipos de entidades principais do modelo de dados são:

- **Tipo_contêiner:** forma de distinção do contêiner quanto às suas propriedades.
- **Porto:** local de embarque e desembarque de contêineres nos navios.
- **Navio:** embarcação responsável pelo transporte dos contêineres entre os portos.
- **Carga:** conjunto de contêineres para transporte, indivisível na visão do modelo.
- **Caminho_rota:** trecho na rede por uma ou mais rotas de navios.

Diretamente relacionado a esses tipos de entidades principais, o modelo também possui alguns tipos de entidades que auxiliam na estrutura dos dados. São eles:

- **Estoque_inicial:** combina porto e tipo de contêiner para estoque inicial.
- **Fluxo_externo:** define entrada e saída de contêineres de sistemas externos.
- **Capac_parada:** combina nó de rota de navio e tipo de contêiner para definir capacidade por tipo.
- **Capac_navio:** relaciona navio à tipo de contêiner para definir uma capacidade específica por tipo.
- **Parada_navio:** parada de navio que compõe uma rota pré-definida. As entidades de nó de rota são agrupadas por navio.
- **Parada_caminho:** parada de navio que compõe um caminho de rota pré-definido. As entidades de nó de caminho são agrupadas por caminho de rota podendo estar relacionadas a uma ou mais rotas.
- **Carga_caminho:** caminho de rota que torna possível atender a carga dentro do intervalo de tempo previsto para o serviço.

Os tipos de entidades são objetos referenciáveis dentro do modelo de dados e permitem o entendimento de todas as suas relações. A Figura 13 ilustra o modelo de dados contendo todos esses tipos de entidades, com seus devidos atributos e, em destaque, as chaves-primárias, que definem a unicidade das entidades no sistema. O modelo requer somente valores numéricos e inteiros para atributos simples de tipos primários. Não foram explicitados, nesse modelo de dados, atributos como nome e descrição de entidades do sistema.

De modo a permitir interface das entidades de entrada com a rede espaço-tempo, estão previstos os atributos de conjunto de nós para tipo de entidade porto e navio, bem como capacidades de arcos para tipo de entidade tipo_contêiner.

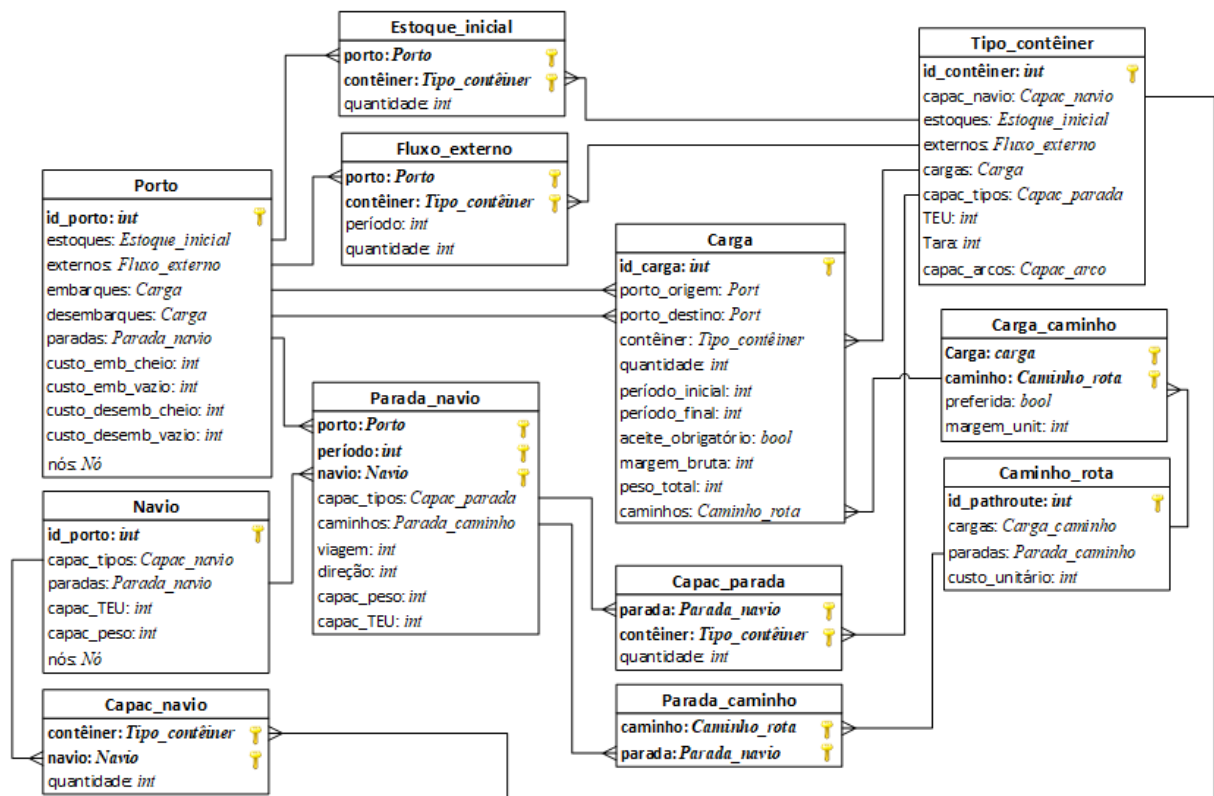


Figura 13 – Modelo de dados das entidades de dados de entrada

4.2.2 Modelo de dados da rede espaço-tempo

Para estrutura da rede espaço-tempo são consideradas entidades adicionais que permitem descrever as relações dos elementos da rede de modo apropriado.

As entidades da estrutura da rede são definidas:

- **Nó**: responsável pelos eventos de início e fim no espaço e tempo na rede
- **Tipo_nó**: classifica os nós em diversos tipos, tal como marítimo e de estoque.

- Arco: interliga eventos entre nós distintos de modo a caracterizar uma atividade.
- Tipo_arco: classifica os arcos de acordo com a finalidade, tal como embarque.
- Capac_arco: define capacidades dos arcos por tipo de contêiner.

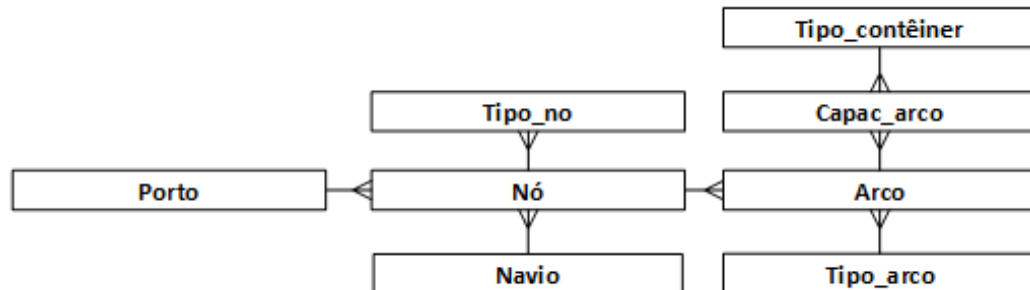


Figura 14 - Visão macro das entidades da estrutura da rede e suas relações

Na Figura 14 são apresentados todos os atributos das entidades da estrutura da rede espaço-tempo, incluindo as suas relações. Não foi considerada nessa representação as entidades que não fazem parte diretamente da estrutura da rede espaço-tempo. Para tanto, a Figura 15 apresenta esse detalhamento.

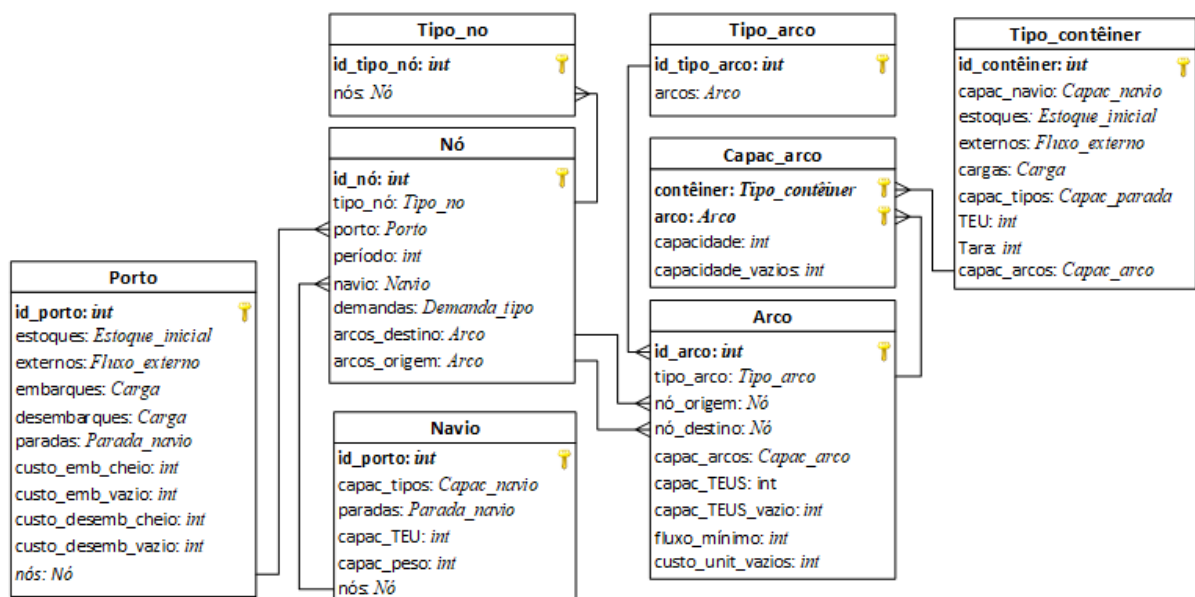


Figura 15 – Modelo de dados das entidades para estrutura da rede espaço-tempo

4.3 INTERFACES

As interfaces de entrada de dados foram desenvolvidas em Microsoft Excel®. A Figura 16 ilustra a tela inicial do sistema de apoio à decisão, organizada da seguinte forma:

- Informações gerais: contendo informações de consulta acerca da instância em execução, evidenciando os tamanhos dos conjuntos.



Na Figura 17 são apresentadas as três tabelas de cadastro básico para o modelo, sendo: i) tipos de contêineres; ii) cadastro de portos e; iii) cadastro de navios. Para cada uma das tabelas devem ser informados os seus respectivos atributos, conforme modelagem proposta.

Tipos de Contêineres			Cadastro de Portos							Cadastro de Navios			
Tipo	TAR	TEUS	PORTO	CALAD	CUSTO EMBL	CUSTO DESEM	CUSTO EMBQ	CUSTO DES	Max Mo	NAVI	TEUS	PESO	Max Vazios TEUS po
K20	2	1	MAO	-1	500	500	450	450	-1	ANAV1	1.380,00	13.800,00	-1
K40	4	2	FOR	-1	460	460	450	450	-1	ANAV2	1.725,00	17.250,00	-1
			SUA	-1	450	450	400	400	-1	ANAV3	1.380,00	13.800,00	-1
			SSA	-1	430	430	400	400	-1	ANAV4	1.725,00	17.250,00	-1
			RIO	-1	450	450	350	350	-1	ANAV5	1.380,00	13.800,00	-1
			SPB	-1	460	460	350	350	-1	BNAV1	1.035,00	10.350,00	-1
			SSZ	-1	530	530	500	500	-1	BNAV2	1.035,00	10.350,00	-1
			PNG	-1	420	420	350	350	-1	CNAV1	1.265,00	12.650,00	-1
			ITJ	-1	430	430	300	300	-1	CNAV2	1.265,00	12.650,00	-1
			RIG	-1	450	450	300	300	-1				

Figura 17 – Tela de cadastros básicos: tipos de contêineres, portos e navios

A tela de cadastro de estoque inicial é ilustrada na Figura 18. Nesse cadastro é informada a quantidade de contêineres para cada combinação de porto e tipo de contêiner. Se considerada uma instância com estoque variável em função do percentual de vazios esperados pela demanda considerada, definir estoque inicial não é necessário. A Figura 19 ilustra a tela para cadastro da capacidade de contêineres por tipo para cada um dos navios; dado vazio é considerado como capacidade irrestrita.

1,00	INICIAL	987	1766	
		K20	K40	
	MAO	236,00	366,00	
	FOR	-	225,00	
	SUA	66,00	225,00	
	SSA	150,00	-	
	RIO	130,00	200,00	
	SPB	-	50,00	
	SSZ	100,00	250,00	
	PNG	55,00	-	
	ITJ	-	150,00	
	RIG	250,00	300,00	

Figura 18 – Tela de cadastro de estoque inicial para cada porto por tipo de contêiner

		K20	K40	
	ANAV1			
	ANAV2			
	ANAV3			
	ANAV4			
	ANAV5			
	BNAV1	500,00		
	BNAV2	500,00		
	CNAV1		400,00	
	CNAV2		400,00	

Figura 19 – Tela de cadastro da capacidade de contêineres por tipo nos navios

A Figura 20 ilustra a tela de cadastro de paradas dos navios nos portos para embarque e desembarque nos contêineres cheios ou vazios.

Todas as cargas a serem transportadas, sejam geradas aleatoriamente para alguma instância em estudo ou informadas manualmente, são cadastradas na tela de cadastro de cargas a serem transportadas, conforme ilustrado na Figura 21. Para cada uma das cargas, também são informadas as rotas associadas de acordo com o porto de origem e destino, bem como a janela de tempo definida para o atendimento; rota de valor negativo representa rota preferencial.

	Navio	Porto	Início	Fim	Peso Máx	Teus Máx	K20	K40
1	ANAV1	MAO	1	1				
2	ANAV1	MAO	3	3				
3	ANAV1	SUA	8	8				
4	ANAV1	SPB	12	12				
5	ANAV1	SSZ	13	13				
6	ANAV1	SSZ	15	15				
7	ANAV1	ITJ	16	16				
8	ANAV1	ITJ	17	17				
9	ANAV1	RIG	18	18				
10	ANAV1	RIG	20	20				
11	ANAV1	PNG	22	22	15000			
12	ANAV1	SSZ	23	23				
13	ANAV1	SSZ	25	25				500
14	ANAV1	RIO	26	26			1000	
15	ANAV1	SSA	28	28		2000		
16	ANAV1	SSA	29	29				
17	ANAV1	FOR	31	31				

Figura 20 – Tela de cadastro de paradas dos navios nos portos para embarque e desembarque

ID	PORTO	PORTO2	DIA EMBARQ	DIA DESEMB	COND ACEITE	Margem Bruta	PESO	K20	K40	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	A
127	124 SPB	SSA	20	30	T	85050	648	54	0		-172	502	0	0	0	
128	125 RIG	SPB	34	49	T	61180	1120	0	35		-2516	3493	3596	4679	0	
129	126 PNG	SUA	48	66	T	31878	609	0	21		-5728	6146	6318	0	0	
130	127 RIO	MAO	37	57	T	43776	432	0	24		-3279	3297	3838	4364	4369	4
131	128 MAO	SSA	45	65	T	20388	48	12	0		-3732	5318	0	0	0	
132	129 SSZ	MAO	5	22	T	60021	507	39	0		359	362	405	573	-576	
133	130 PNG	MAO	22	50	T	62405	1085	0	35		-2952	3660	3993	3995	4002	4
134	131 RIO	SSA	33	43	T	16764	220	0	11		-1080	1444	1822	0	0	
135	132 RIG	SUA	6	24	T	11627	161	7	0		-423	657	938	942	949	1
136	133 ITJ	RIO	42	62	T	17787	352	0	11		4232	4233	4801	4803	5278	5
137	134 ITJ	SSA	10	36	T	5124	90	0	3		822	-966	1123	1126	1288	1
138	135 SSZ	ITJ	32	50	T	83150	1000	0	50		-1082	1824	3466	3758	3841	3
139	136 SSZ	MAO	15	36	T	55230	350	35	0		762	765	1053	-1056	1410	1
140	137 MAO	FOR	10	50	T	32100	100	0	20		91	289	730	1343	1389	1
141	138 MAO	SSZ	3	29	T	13744	32	8	0		-38	89	155	284	287	
142	139 SUA	PNG	20	44	T	36938	92	23	0		-459	1012	1745	2158	3119	3
143	140 PNG	MAO	22	43	T	35952	420	21	0		-2952	3660	3993	3995	4002	
144	141 MAO	SUA	10	23	T	57204	216	0	36		-16	92	0	0	0	
145	142 MAO	PNG	31	58	T	32180	120	0	20		1388	2219	2683	3209	3729	-4
146	143 MAO	RIO	24	45	T	17545	66	0	11		-1750	1751	2200	2204	2207	2
147	144 MAO	PNG	45	63	T	40272	120	24	0		-3209	0	0	0	0	
148	145 SSA	ITJ	26	52	T	25136	96	0	16		-1354	1685	2185	2556	2559	2

Figura 21 – Tela para cadastro de cargas a serem transportadas.

Os caminhos de rota, antes de executar a otimização, são conhecidos e fornecidos em tabela de cadastro específica, conforme ilustrado na Figura 22. Todas as possibilidades de caminhos são enumeradas, inclusive com opções de transbordo, quando permitido. Esses caminhos de rota são vinculados a cada carga a ser transportada referenciando o caminho de rota preferencial e os alternativos para decisão de alocação de carga.

Par	Id	Custo	Navio	Tipo	Origem	Início	Destino	Fim	Transbordos	W1	W2	W3	W4	W5	W6	V
FOR_MAO	1	0	ANAV2	C	FOR	3	MAO	7	0	031	032	-	-	-	-	
PNG_SSZ	2	0	ANAV3	C	PNG	1	SSZ	2	0	058	059	-	-	-	-	
SUA_SPB	3	0	ANAV5	C	SUA	1	SPB	5	0	115	116	-	-	-	-	
RIO_SUA	4	0	BNV2	C	RIO	2	SSA	4	0	179	180	-	-	-	-	
SSA_SUA	5	0	CNAV1	C	SSA	1	SUA	2	0	214	215	-	-	-	-	
MAO_SUA	6	0	ANAV1	C	MAO	3	SUA	8	0	002	003	-	-	-	-	
ITJ_RIG	7	0	ANAV4	C	ITJ	3	RIG	4	0	086	087	-	-	-	-	
SPB_SSZ	8	0	ANAV5	C	SPB	5	SSZ	6	0	116	117	-	-	-	-	
SUA_SSZ	9	0	ANAV5	C	SUA	1	SSZ	6	0	115	116	117	-	-	-	
SSZ_RIO	10	0	BNV1	C	SSZ	8	RIO	9	0	148	149	-	-	-	-	
SUA_PNG	11	0	CNAV1	C	SUA	2	PNG	6	0	215	216	-	-	-	-	
SSA_PNG	12	0	CNAV1	C	SSA	1	PNG	6	0	214	215	216	-	-	-	
RIG_SSZ	13	0	CNAV2	C	RIG	3	SSZ	5	0	249	250	-	-	-	-	
SUA_SPB	14	0	ANAV1	C	SUA	8	SPB	12	0	003	004	-	-	-	-	
MAO_SPB	15	0	ANAV1	C	MAO	3	SPB	12	0	002	003	004	-	-	-	
MAO_SUA	16	0	ANAV2	C	MAO	10	SUA	15	0	033	034	-	-	-	-	
FOR_SUA	17	0	ANAV2	C	FOR	3	SUA	15	0	031	032	033	034	-	-	
FOR_SSZ	18	0	BNV2	C	FOR	8	SSZ	14	0	184	185	-	-	-	-	
SSZ_RIO	19	0	ANAV3	C	SSZ	4	RIO	5	0	060	061	-	-	-	-	
PNG_RIO	20	0	ANAV3	C	PNG	1	RIO	5	0	058	059	060	061	-	-	
ITJ_RIG	21	0	CNAV1	C	ITJ	7	RIG	8	0	217	218	-	-	-	-	
SUA_SUA	22	736	ANAV5	C	SUA	1	SSA	8	1	115	116	251	252	-	-	

Figura 22 – Tela de caminhos de rota conforme cadastro de paradas dos navios.

4.4 PROCESSAMENTOS

Todos os processamentos do Sistema de Apoio à decisão são realizados em rotinas implementadas em linguagem Python®, invocadas inicialmente pelo Microsoft Excel® por meio de rotina específica.

O procedimento de execução completo é iniciado pelo carregamento das informações da planilha em memória. Na sequência, uma rede espaço-tempo é gerada na memória para a instância em execução. A partir da rede espaço-tempo gerada em memória, é realizado o mapeamento dos caminhos de rota possíveis restringido pelo número de transbordos permitidos.

Uma vez conhecido o conjunto de caminhos de rota com seus respectivos atributos é possível realizar o sorteio de conjunto de cargas, considerando um cenário simulado. Em cenários reais é possível informar previamente todas as cargas com seus atributos sem necessidade de executar a rotina de geração aleatória de cargas.

Sempre antes da otimização, a rede espaço-tempo é recarregada, de modo a agregar informações referentes às cargas. Na sequência, a otimização da rede espaço-tempo é realizada por meio da biblioteca do Gurobi, no Python. Por fim, os resultados da otimização são interpretados e registrados na planilha do Microsoft Excel®.

Todas as informações de entrada e saída das instâncias são registradas na planilha. Com base nesses dados da planilha é possível salvar esses dados de entrada e de saída para posterior análise.

5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo, a sistemática proposta é aplicada a dados alinhados com a realidade de companhia de navegação. Inicialmente, em um primeiro caso, é apresentada uma rede de transporte pequena de modo a ilustrar as funcionalidades básicas do modelo. Na sequência, a sistemática é aplicada em um caso grande, realizando diversas análises de sensibilidade quanto à demanda e oferta de contêineres no sistema. Todas as instâncias são executadas em computador com Intel® Core™ i7-3770 CPU 3.4GHz, 16Gbytes de memória RAM e sistema Microsoft Windows 7 Pro 64bits.

5.1 CASO 1: UM PROBLEMA PEQUENO

Uma rede espaço-tempo de exemplo é ilustrada na Figura 23 com três portos ($S = \{s_1, s_2, s_3\}$), nove períodos em dias ($T = \{0, 1, 2, \dots, 8\}$), dois navios ($V = \{v_1, v_2\}$), dois tipos de contêineres ($K = \{k20, k40\}$), sete cargas ($R = \{r_1, r_2, \dots, r_8\}$), e 19 caminhos de rota ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_{19}\}$). NSG representa o nó de fonte global e NTG representa o nó de sorvedouro global; os subconjuntos de nós 1-9, 10-18 e 19-27 representam os nós de estoque para os portos s_1 , s_2 e s_3 , respectivamente; e, os subconjuntos de nós 29-35 a 36-40 representam nós marítimos para os navios v_1 e v_2 , respectivamente. Foram desconsiderados todos os nós e arcos desnecessários para simplificar a rede em todas as instâncias.

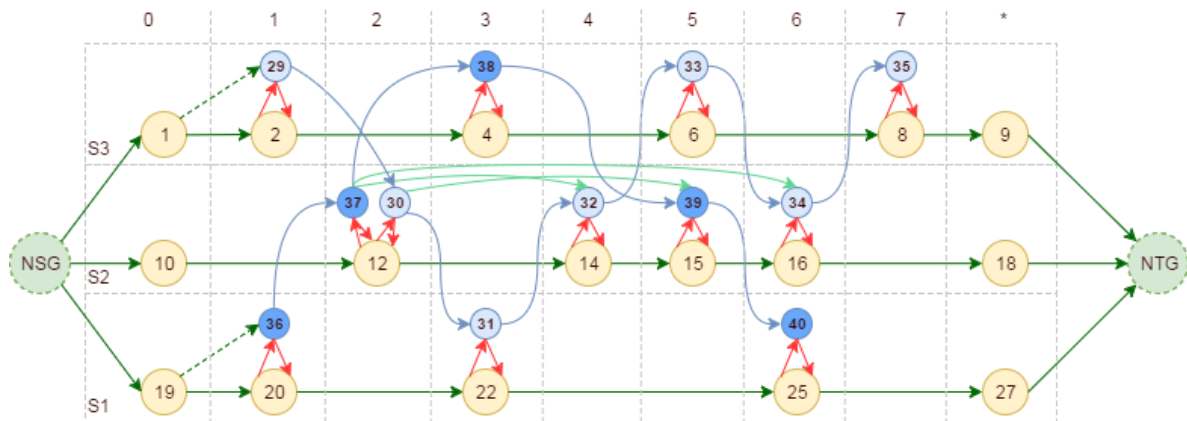


Figura 23 – Rede espaço-tempo para o caso 1 de exemplo
Fonte: Própria

A quantidade equivalente, em TEU, é definida como $a_{k20} = 1$ e $a_{k40} = 2$; dois contêineres k20 equivalem a um contêiner k40, em tamanho para restrições de espaço nos navios. Um vazio do tipo k20 pesa, em toneladas, $\beta_{k20} = 5$; e um do tipo k40 pesa $\beta_{k40} = 10$. As capacidades em espaço e em peso para o transporte de contêineres nos vazios são definidas

por $\Omega_{ij} = 200$, em toneladas, e $U_{ij} = 10$, em TEU, para cada arco $(i, j) \in A^{MT}$ onde $v_i = v_1$; e $\Omega_{ij} = 200$ e $U_{ij} = 16$ para cada arco $(i, j) \in A^{MT}$ onde $v_i = v_2$. Considere $u_{ij,k} = U_{ij}$ para cada contêiner $k \in K$; em todo caso, o atributo $u_{ij,k}$ pode ser aplicado considerando um tipo específico de contêiner. A restrição de capacidade máxima de vazios nos navios definida pelos atributos z_{ij} e Z_{ij} para cada arco $(i, j) \in A$ não é considerada nesse caso de exemplo.

Existem 28 contêineres do tipo k20 no estoque do porto s_1 e 10 contêineres do tipo k40 no estoque do porto s_3 . Então, os limites inferiores para cada variável de fluxo nos arcos auxiliares onde $i = NSG$ e $j \in A^{IV}$ são $l_{ij,k20} = 28$ e $l_{ij,k40} = 0$ se $s_j = s_1$; $l_{ij,k20} = 0$ e $l_{ij,k40} = 0$ se $s_j = s_2$; e $l_{ij,k20} = 0$ e $l_{ij,k40} = 10$ se $s_j = s_3$.

Os custos de embarque e desembarque de vazios são \$ 1 por contêiner por evento; então, $C_{ij,k} = 1$ para cada arco $(i, j) \in (A^{LD} \cup A^{UD})$; por exemplo, os custos no arco $(i', j') = (12, 37)$ são $C_{i'j',k20} = 1$ e $C_{i'j',k40} = 1$.

De modo similar, os custos de embarque e desembarque de um contêiner cheio são \$ 2 por contêiner por evento, ou seja, $C_{ij,k} = 2$ para cada arco $(i, j) \in (A^{LD} \cup A^{UD})$; este tipo de custo é somente aplicado em arcos que representam o transbordo dado que os custos do primeiro embarque e último desembarque de cargas estão deduzidos na margem de contribuição bruta conhecida para cada carga. No exemplo, o custo de transbordo de contêineres cheios entre dois navios é igual a $C_{ij,k} = 4$ por contêiner por evento para cada arco $(i, j) \in A^{TS}$.

Um subconjunto de caminhos de rota é definido para cada carga de modo a transportar os contêineres cheios de um porto de origem $s \in S$ a um porto de destino $s' \in S$ tal que $s \neq s'$. Então, os caminhos de rota são conhecidos para cada par de portos de origem e destino.

Cada caminho de rota é um subconjunto de arcos inter-relacionados. A Tabela 1 apresenta, para cada caminho $p \in P$, o porto de origem $s \in S$, o porto de destino $s' \in S$, o custo marginal c_p e uma sequência de arcos $F_p \subset A$.

A Tabela 2 apresenta cada carga $r \in R$ o tipo de contêiner $k_r \in K$, a quantidade de contêineres (q_r), o peso bruto da carga (w_r), a margem de contribuição ($g_{p,r}$), o porto de origem (si_r), o porto de destino (sf_r), um período inicial (ti_r) e um período final (tf_r) para o transporte da carga. Todas as cargas estão disponíveis para carregar no seu porto de origem no período ti_r e com um período tf_r máximo para descarregar no porto de destino.

$p \in P$	Porto de origem $s \in S$	Porto de destino $s' \in S$	Custo marginal c_p	Sequência de arcos $F_p \subset A$
p1	s3	s2	\$0/TEU	{(2,29), (29,30), (30,12)}
p2	s1	s2	\$0/TEU	{(20,36), (36,37), (37,12)}
p3	s2	S1	\$0/TEU	{(12,30), (30,31), (31,22)}
p4	s3	S1	\$0/TEU	{(2,29), (29,30), (30,31), (31,22)}
p5	s2	s3	\$0/TEU	{(12,37), (37,38), (38,4)}
p6	s1	s3	\$0/TEU	{(20,36), (36,37), (37,38), (38,4)}
p7	s1	s2	\$0/TEU	{(22,31), (31,32), (32,14)}
p8	s3	s2	\$4/TEU	{(2,29), (29,30), (30,39), (39,40), (40,25)}
p9	s2	s3	\$0/TEU	{(15,39), (39,40), (40,25)}
p10	s1	s3	\$0/TEU	{(4,38), (38,39), (39,15)}
p11	s2	s1	\$4/TEU	{(20,36), (36,37), (37,32), (32,33), (33,6)}
p12	s3	s1	\$4/TEU	{(20,36), (36,37), (37,34), (34,35), (35,8)}
p13	s3	s2	\$0/TEU	{(14,32), (32,33), (33,6)}
p14	s2	s3	\$0/TEU	{(22,31), (31,32), (32,33), (33,6)}
p15	s3	s1	\$0/TEU	{(4,38), (38,39), (39,40), (40,25)}
p16	s1	s3	\$0/TEU	{(6,33), (33,34), (34,16)}
p17	s1	s3	\$0/TEU	{(16,34), (34,35), (35,8)}

Tabela 1 – Caminhos de rota para o caso de exemplo
Fonte: Própria

Carga $r \in R$	Tipo de contêiner k_r	Quantidade (q_r)	Peso bruto ω_r	Margem de contribuição (g_{ur})	Porto de origem (si_r)	Porto de destino (sf_r)	Período inicial (ti_r)	Período final (tf_r)
r1	k20	8	110	\$ 13 / TEU	s1	s3	1	4
r2	k20	3	70	\$ 12 / TEU	s1	s3	1	7
r3	k20	2	30	\$ 14 / TEU	s2	s3	1	5
r4	k20	15	150	\$ 11 / TEU	s1	s2	2	5
r5	k20	13	150	\$ 9 / TEU	s2	s1	1	7
r6	k20	11	156	\$ 10 / TEU	s3	s1	1	7
r7	K40	10	200	\$ 10 / TEU	s2	s1	1	7

Tabela 2 – Definições das cargas para o caso de exemplo
Fonte: Própria

A Tabela 3 apresenta a margem unitária ($g_{p,r}$) para transportar contêineres cheios de cada carga $r \in R$ e caminho de rota $p \in P$ de acordo com a Equação (8), na subseção 4.4.6. Os valores em destaque (*) são definidos como de mínimo custo. Nesse exemplo, os caminhos de rotas de mínimo custo são as preferenciais; os demais caminhos são alternativos, escolhidos se houver problemas de falta de capacidade para o atendimento. Se uma carga $r \in R$ é aceita para transportar via um caminho de rota $p \in P_r$, a margem de contribuição unitária $g_{p,r}$ é adicionada ao resultado da função objetivo.

Assumindo que somente as cargas r1 e r2 são selecionadas, o caminho de rota preferencial p4 é alocado para ambas; nesse caso, o valor da função objetivo é \$ 132, considerando que não há necessidade de reposicionamento de vazios para viabilizar o atendimento.

Carga $r \in R$	Caminhos de rota $p \in P$ pertencente à $P_r \in P$											
	p3	p4	p5	p6	p8	p10	p11	p12	p13	p14	p15	p17
r1	-	\$96*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
r2	-	\$36*	-	-	\$21	-	-	-	-	-	\$33	-
r3	\$28*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
r4	-	-	-	-	-	\$165*	-	-	-	-	-	-
r5	-	-	\$117*	-	-	-	-	-	\$104	-	-	\$104
r6	-	-	-	\$110*	-	-	\$55	\$55	-	\$99	-	-
r7	-	-	\$100*	-	-	-	-	-	\$90	-	-	\$90

Tabela 3 – Margem de contribuição unitária para cada combinação de carga e caminho de rota

Fonte: Própria

Acrescentando a carga r3 à seleção, dois vazios são reposicionados do porto s1 para o porto s2 pelo navio v1 e há uma realocação para a carga r2 para o caminho de rota alternativo p15 devido a um excesso de capacidade no navio v1. Desse modo, a função objetivo aumenta em \$ 153, considerando custos de reposicionamento e diferença de margem na realocação.

Selecionando também a carga r4, a carga r2 é alocada novamente ao caminho de rota preferencial p4, inviabilizando o transporte da carga r3 por falta de capacidade no navio v1. Essa modificação é benéfica, dado que a carga r4 é mais rentável que a carga r3, bem como a carga r2 é novamente alocada na rota preferencial de maior ganho. Desse modo, a função objetivo aumenta para \$ 297.

Considerando todas as cargas para o transporte, somente a carga r3 é rejeitada. Existem, na solução, quatro contêineres k40 reposicionados do porto s3 para o porto s2 para atendimento da carga r7.

5.2 CASO 2: UM PROBLEMA GRANDE

5.2.1 Desenho do Experimento

O segundo caso representa cenários hipotéticos consistentes com a realidade observada em companhias de navegação. Foram considerados dez portos e nove navios na rede de serviços.

A Figura 24 ilustra a visão geográfica do sistema de transporte marítimo considerada nesse caso, bem como a estrutura topológica para serviços semanais de cada navio ao longo do horizonte de planejamento com 60 períodos, em dias. Os navios do Serviço A realizam um ciclo de 35 dias e os navios do Serviço B e C realizam um ciclo de 14 dias.

Em um horizonte de planejamento de 60 dias, foram definidas todas as datas, detalhadas no Apêndice B, contendo cada combinação de navio, porto e dia de parada conforme a topologia da rede previamente definida.

O Quadro 13 apresenta a primeira e a última parada conhecidas de cada navio dentro do horizonte de planejamento.

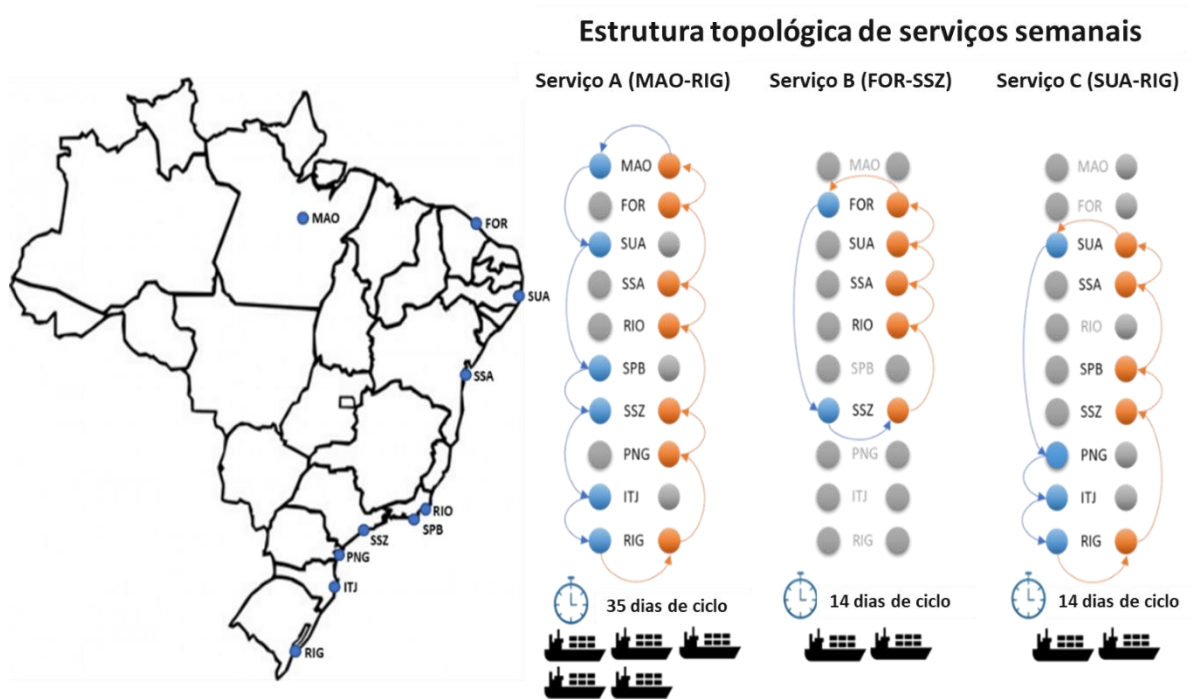


Figura 24 – Visão geográfica do sistema de transporte marítimo e estrutura topológica dos serviços

Navio	Primeira parada		Última parada	
	Porto	Dia	Porto	Dia
ANAV1	MAO	1	SSZ	60
ANAV2	FOR	3	RIG	60
ANAV3	PNG	1	SUA	57
ANAV4	ITJ	2	MAO	59
ANAV5	SUA	1	FOR	59
BNAV1	SSZ	7	FOR	57
BNAV2	RIO	2	SSA	60
CNAV1	SSA	1	SUA	58
CNAV2	RIG	1	RIG	59

Quadro 13 – Primeira e última parada de cada navio dentro do horizonte de planejamento

A Figura 25 apresenta uma representação, no espaço-tempo, da rota dos navios do Serviço A, onde o eixo vertical representa os portos e o eixo horizontal representa os períodos. Desse mesmo modo, a rota dos navios do Serviço B é apresentado na Figura 26 e do Serviço C é apresentado na Figura 27.



Figura 25 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço A



Figura 26 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço B



Figura 27 – Representação no espaço-tempo da rota dos navios do Serviço C

Conforme a Tabela 4, o serviço A contém navios com capacidades de 1.380 e 1.725 TEUs. O serviço B contém navios com capacidade de 1.035 TEUs. O serviço C contém navios com capacidade de 1.265 TEUs. Conforme observado na prática, há uma razão entre 10 toneladas para cada capacidade em TEU do navio. Desse modo um navio de 1.265 TEUs possui, em peso, capacidade de 12.650 toneladas. Foi considerado esta razão quando se tratando da capacidade do navio. As capacidades dos navios em todas as instâncias executadas são fixas, considerando decisões em nível operacional.

Serviço	Navio	Capacidade em TEUs	Capacidade em Peso
A	ANAV1	1.380	13.800
	ANAV2	1.725	17.250
	ANAV3	1.380	13.800
	ANAV4	1.725	17.250
	ANAV5	1.380	13.800
B	BNAV1	1.035	10.350
	BNAV2	1.035	10.350
C	CNAV1	1.265	12.650
	CNAV2	1.265	12.650

Tabela 4 – Capacidade em TEUs e em peso dos navios

Dois tipos de contêineres foram determinados, 20DC e 40DC, com diferentes dimensões. Para cada tipo de contêineres, conhece-se o peso quando vazio (tara) e o número em TEUs. A tara dos contêineres 20DC é igual a duas toneladas e dos 40DC é quatro toneladas. Os contêineres 20DC equivalem a 1 TEU e os contêineres 40DC equivalem a 2 TEUs.

Neste problema, cada embarque e desembarque de vazios custa de \$ 300 a \$ 500 por contêiner, respectivamente; não foram considerados limites desses movimentos de embarque e desembarque em um mesmo período. No caso de contêineres cheios, estas atividades custam de \$ 420 a \$ 530. Os custos de transbordo de contêiner cheio de um navio a outro é 80% da soma do custo de embarque e de desembarque por porto e por contêiner. Durante o transbordo, todas as atividades, tais como desembarque de um navio, estadia no porto e embarque no outro navio são consideradas. Todos esses custos não variam por tipo de contêiner e são específicos por porto, conforme a Tabela 5.

Porto	Custo de vazios		Custo de Cheios		
	Embarque	Desembarque	Embarque	Desembarque	Transbordo
MAO	\$ 450	\$ 450	\$ 500	\$ 500	\$ 800
FOR	\$ 450	\$ 450	\$ 460	\$ 460	\$ 736
SUA	\$ 400	\$ 400	\$ 450	\$ 450	\$ 720
SSA	\$ 400	\$ 400	\$ 430	\$ 430	\$ 688
RIO	\$ 350	\$ 350	\$ 450	\$ 450	\$ 720
SPB	\$ 350	\$ 350	\$ 460	\$ 460	\$ 736
SSZ	\$ 500	\$ 500	\$ 530	\$ 530	\$ 848
PNG	\$ 350	\$ 350	\$ 420	\$ 420	\$ 672
ITJ	\$ 300	\$ 300	\$ 430	\$ 430	\$ 688
RIG	\$ 300	\$ 300	\$ 450	\$ 450	\$ 720

Tabela 5 – Custos de embarque e desembarque de contêineres para cada porto

O estoque inicial de contêineres vazios é uma porção da demanda de contêineres em cada porto. Com base em um conjunto de cargas R previamente conhecido com seus atributos, principalmente porto de origem (si_r), tipo de contêiner (k_r) e quantidade de contêineres (q_r), é possível estimar os estoques iniciais para as instâncias de teste, considerando o fato que o momento inicial do planejamento atual é reflexo dos últimos resultados do planejamento anterior, em especial os estoques. Assim, os estoques finais do período anterior ao início do horizonte de planejamento serão os estoques iniciais a serem considerados. Com base nessa estratégia para geração dos estoques iniciais, é possível estudar diversos cenários de demanda e estoques mais realistas.

A equação (33) apresenta a equação para estimativa do estoque inicial para as instâncias dos experimentos hipotéticos considerados. O estoque inicial é definido como o fluxo mínimo $l_{ij,k}$ para cada tipo de contêiner $k \in K$ e arco $(i,j) \in A^{AX}$ onde $i = NTG$ e s_j referente ao porto $s \in S$. Desse modo, o estoque inicial é representado como uma porção da soma da demanda de contêineres obtida pelo atributo q_r ; tal porção é ajustada pelo parâmetro ψ . Este parâmetro é uma constante positiva normalmente variando de 0,3 a 0,5. Considerando uma instância de análise com uma oferta suficiente de contêineres vazios para atender toda a demanda do porto e sem reposicionamentos, é definido $\psi = 1$.

$$l_{ij,k} = \psi \left(\sum_{r \in R | k_r = k, s_{i_r} = s'} q_r \right) \forall (i,j) \in A^{AX}, s \in S, k \in K | i = NSG, s_j = s \quad (33)$$

No mesmo raciocínio, considerando um planejamento rolante, é importante definir uma necessidade mínima de estoques finais nos portos. Então, é garantida uma porção mínima de contêineres ao final do período em cada porto, ajustada pelo parâmetro χ . O parâmetro é positivo e menor ou igual a 1. Para cenários menos restritivos, é definido $\chi = 0$.

A equação (34) é relacionada com a equação (33) e estima os estoques finais mínimos com base no fluxo mínimo $l_{ij',k}$ para cada tipo de contêiner $k \in K$ e arco $(i,j') \in A^{AX}$, levando em conta o arco $(i',j) \in A^{AX}$, onde $i = NSG$, $j = NTG$ e $s_{i'} = s_{j'}$.

$$l_{ij',k} = \chi l_{i'j,k} \forall (i,j') \in A^{AX}, s \in S, k \in K | i' = NSG, j' = NTG \quad (34)$$

Além dos estoques de contêineres disponíveis nos portos no início do horizonte de planejamento, existem contêineres cheios embarcados em navios oriundos de horizonte de planejamento anterior para desembarcar nos períodos iniciais ao final das viagens.

A Tabela 6 apresenta as quantidades de contêineres em transporte nos navios para cada destino por tipo de contêiner. O primeiro valor da célula é a quantidade de contêineres K20 e o segundo valor é a quantidade de contêineres K40.

A Tabela 7 apresenta o peso bruto da carga em transporte nos navios para cada próximo destino no início do horizonte de planejamento considerado. De modo mais realista, junto com a informação de quantidade de contêineres, é possível representar uma capacidade disponível nos navios para as novas cargas a serem alocadas.

Navio	Porto									
	MAO	FOR	SUA	SSA	RIO	SPB	SSZ	PNG	ITJ	RIG
ANAV1		0 5	0 6	9 9	0 26	0 80	75 0	0 52	0 88	0 3
ANAV2	0 26				0 76	0 10	0 40	0 108	0 78	
ANAV3	0 87	0 50	0 41	0 23	17 0	0 1	0 15			
ANAV4	23 0	0 8	109 0	0 50	0 12	0 11	0 4			
ANAV5					0 5	0 25	0 8	0 111	48 0	0 172
BNAV1		0 17	0 95	0 130						
BNAV2		0 73	0 86	0 39						
CNAV1						5 0	0 67	151 0	2 0	0 161
CNAV2			106 0	0 230		14 0	0 45			

Tabela 6 – Quantidade de contêineres em transporte nos navios para cada destino por tipo de contêiner

Navio	Porto									
	MAO	FOR	SUA	SSA	RIO	SPB	SSZ	PNG	ITJ	RIG
ANAV1		35	42	54	130	480	300	260	528	15
ANAV2	182				532	70	240	450	468	688
ANAV3	2.697	1.500	1.353	713	391	33	480			
ANAV4	460	224	2.289	1.450	336	363	120			
ANAV5					25	150	48	777	192	860
BNAV1		357	1.710	2.470						
BNAV2		1.679	1.892	858						
CNAV1						20	469	604	10	1.127
CNAV2			2,438	6,670		322	1.395			

Tabela 7 – Peso bruto da carga em transporte nos navios para cada próximo destino

O sistema de transporte marítimo foi analisado e 6.545 caminhos de rota foram enumerados para todos pares de portos de origem e de destino no horizonte de planejamento. Desse total, 1.033 caminhos de rota (16%) não possuem transbordo entre navios; o restante, 5.512 caminhos de rota (84%), considera um transbordo.

Não houve necessidade de considerar caminhos de rota com dois ou mais transbordos em virtude do tipo da topologia de rede considerada. Entretanto, o modelo permite considerar caminhos de rota com mais de um transbordo.

5.2.2 Análise dos conjuntos de instâncias

As Tabela 8 e 9 apresentam resultados com base na variação da demanda de carga e do suprimento de contêineres, respectivamente, para diversos grupos de instâncias. É possível notar, na Tabela 8, que o tempo de execução versus demanda de carga apresenta uma correlação positiva ($\rho=0,97$). As instâncias contêm, em média, 12 variáveis binárias relacionadas a cada carga, sendo estas variáveis definidas para decisão de escolha de rota para transporte de contêineres cheios.

O maior conjunto de instâncias na Tabela 9 (15% de capacidade de vazios) considera a razão entre demanda e suprimento de 4,62 alocações de contêineres para transporte das cargas para cada contêiner disponível no sistema ao longo do horizonte de planejamento.

Todos conjuntos de instâncias apresentam um *gap* menor que 0,08%, em média, exceto o conjunto que considera 1.400 cargas e 15% de capacidade de vazios no qual os *gaps* são 0,14% e 0,11%, respectivamente.

Demanda de Cargas	Média %GAP	Média do tempo execução (s)	Média nº variáveis	Média variáveis binárias	Função Objetivo (\$)	Média demanda em TEUS	Capacidade de vazios
400	0.00%	10	36.323	4.893	13.279.806	20.026	10.242
600	0.00%	606	38.965	7.475	20.320.162	28.135	13.521
800	0.03%	3.783	41.672	10.081	26.217.282	35.860	16.636
1,000	0.06%	7.303	43.999	12.309	30.363.858	43.941	20.038
1,200	0.08%	7.713	46.648	14.857	33.940.840	51.724	23.206
1,400	0.14%	13.409	49.327	17.436	37.856.822	59.828	26.449
Média geral	0.05%	5.471	42.822	11.175	26.996.462	39.919	18.349

Tabela 8 – Sensibilidade para a variação da demanda de carga

% Capacidade de Vazios	Média %GAP	Média do tempo execução (s)	Média nº variáveis	Média variáveis binárias	Função Objetivo (\$)	Média demanda em TEUS	Capacidade de vazios
100%	0.02%	2.530	42.359	11.175	\$ 27.906.926	39.919	33.100
50%	0.04%	4.399	43.298	11.175	\$ 27.609.869	39.919	18.709
30%	0.04%	4.746	43.298	11.175	\$ 26.931.645	39.919	12.951
15%	0.11%	10.207	42.333	11.175	\$ 25.537.406	39.919	8.634
Média geral	0.05%	5.471	42.822	11.175	\$ 26.996.462	39.919	18.349

Tabela 9 – Sensibilidade para a variação da demanda de carga

Foram analisados os picos de utilização de capacidade em TEU e em peso de acordo com a demanda de carga considerando instâncias com diferentes níveis de suprimento. A Figura 28 apresenta o pico de utilização de capacidade em TEUs e a Figura 29 apresenta o pico de utilização de capacidade em peso. Instâncias com uma maior quantidade de cargas para transportar apresentam pico mais alto de utilização nos navios.

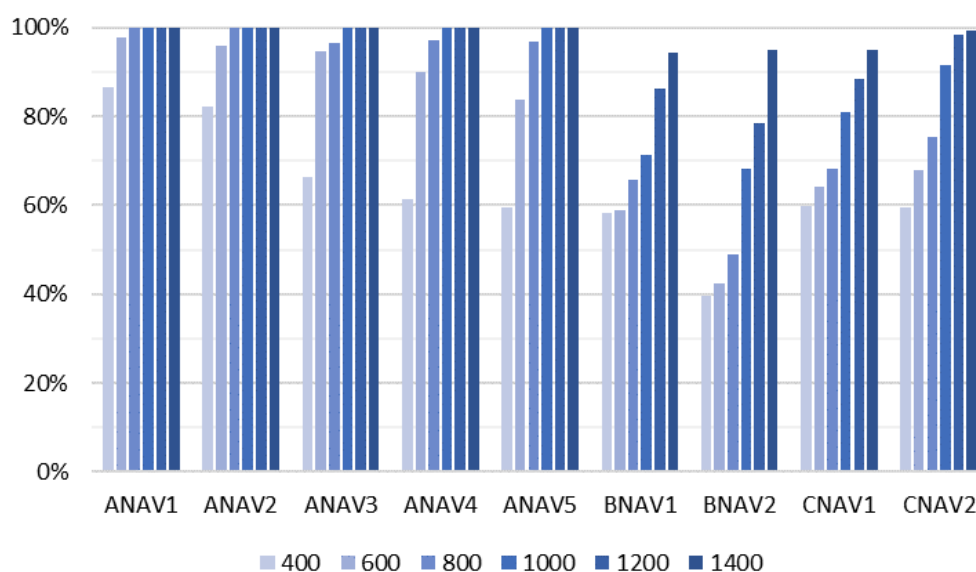


Figura 28 – Pico de utilização de capacidade em TEUs

Como exemplo, o serviço A (ANAV1 até ANAV5) apresenta alto grau de pico de utilização na maioria das instâncias analisadas. Serviço B (BNAV1 e BNAV2) interliga os portos SSZ e RIO aos portos do Nordeste (portos de SSA, SUA e FOR); a demanda entre Sudeste e Nordeste representa 11% do total esperado.

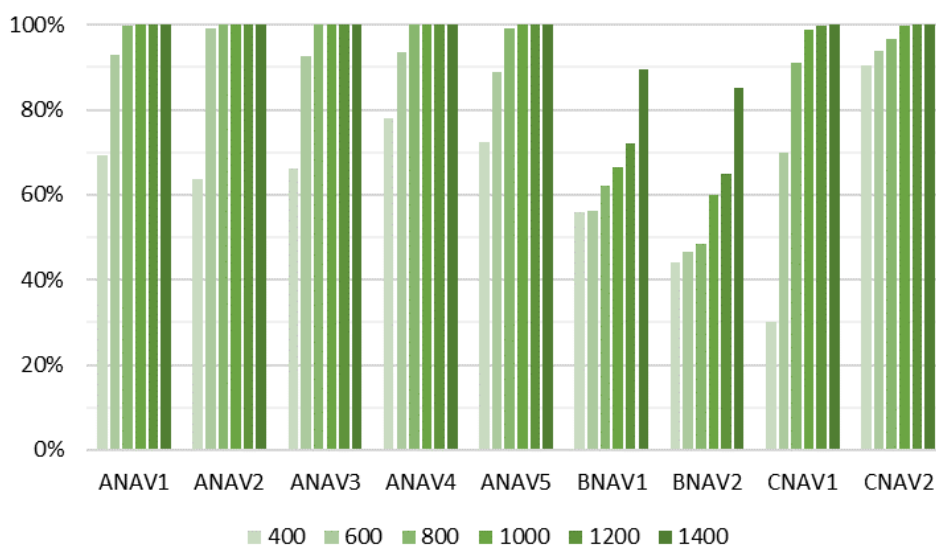


Figura 29 – Pico de utilização de capacidade em peso

A Tabela 10 apresenta a demanda de contêineres rejeitada, realocação de carga, realocação de carga em rotas alternativas para evitar rejeição, percentual de cargas rejeitadas e contêineres vazios reposicionados. Existe um crescimento da necessidade de reposicionamento de vazios com a redução do número de contêineres disponíveis para as movimentações.

Demanda / Oferta em TEUs	Rejeição			Realocação de cargas	Reposição de vazios
	20DC	40DC	% Cargas rejeitadas		
1,2	62	2.601	9,55%	98	32
2,1	189	2.620	10,60%	96	207
3,0	424	2.691	12,21%	101	582
4,5	770	3.069	15,77%	125	962

Tabela 10 – Reposicionamento de contêineres por demanda/suprimentos em TEUs

A Tabela 11 permite verificar que quanto maior o número de cargas no horizonte de planejamento, maior a possibilidade de aproveitar o transporte das cargas para o reuso dos contêineres em outros portos, sem a necessidade de reposicionamento, reduzindo custos. Entretanto, o número de cargas realocadas e o percentual de cargas rejeitadas aumenta em virtude da capacidade limitada dos navios.

Demanda			Rejeição			Realocação de cargas	Vazios reposicionados	Utilização total dos navios	
Cargas	20DC	40DC	20DC	40DC	Cargas			TEUs	Peso
400	3.555	8.235	17	256	3,08%	18	728	31%	23%
600	4.937	11.599	57	475	3,85%	45	749	42%	33%
800	6.272	14.794	210	1,104	7,20%	100	435	51%	40%
1.000	7.378	18.281	468	2,883	14,61%	127	284	55%	44%
1.200	8.659	21.532	644	4,925	20,15%	156	263	59%	47%
1.400	10.112	24.858	770	6,828	23,30%	184	215	62%	50%

Tabela 11 – Reposicionamento de contêineres por demanda de carga

A Tabela 12 apresenta a razão entre estoque final e inicial por porto que representa a importação/exportação de contêineres em cada porto (nas colunas), relacionado a cada grupo de instâncias por quantidade de cargas (nas linhas). Foi considerado que portos de exportação possuem razão menor que 1 e portos de importação possuem razão superior a 1. É possível notar que o porto MAO é majoritariamente de exportação em TEUs, numa razão de 7 contêineres sendo importados para cada 10 contêineres exportados. As cargas exportadas do porto MAO são as menos pesadas e sozinhas detêm 33% de toda a demanda no planejamento, de acordo com a matriz de demanda e suprimento apresentada na Tabela 5.

Cargas	MAO	FOR	SUA	SSA	RIO	SPB	SSZ	PNG	ITJ	RIG
400	▼ 0,70	▼ 0,81	■ 1,14	■ 1,16	▼ 0,80	▼ 0,69	■ 1,03	▲ 1,41	▲ 1,53	▲ 1,43
600	▼ 0,72	▼ 0,87	▲ 1,27	▲ 1,30	▼ 0,89	▼ 0,69	▼ 0,88	▲ 1,43	▲ 1,31	▲ 1,35
800	▼ 0,72	▼ 0,90	■ 1,16	▲ 1,26	▼ 0,93	▼ 0,80	▼ 0,80	▲ 1,44	▲ 1,29	▲ 1,37
1000	▼ 0,68	■ 0,97	■ 1,09	▲ 1,27	▼ 0,90	▼ 0,74	▼ 0,87	▲ 1,50	▲ 1,47	▲ 1,41
1200	▼ 0,70	■ 0,99	■ 1,01	▲ 1,29	▼ 0,90	▼ 0,78	▼ 0,83	▲ 1,44	▲ 1,53	▲ 1,36
1400	▼ 0,71	■ 1,07	■ 1,10	▲ 1,33	▼ 0,85	▼ 0,86	▼ 0,85	▲ 1,35	▲ 1,37	▲ 1,34
Total	▼ 0,71	■ 0,94	▲ 1,13	▲ 1,27	▼ 0,88	▼ 0,76	▼ 0,88	▲ 1,43	▲ 1,42	▲ 1,38

Tabela 12 – Razão entre estoque final e inicial por porto

Os portos do Sul (PNG, ITJ e RIG) são majoritariamente de importação: 14 contêineres são importados a cada 10 contêineres exportados. Os portos do Sudeste (RIO, SPB e SSZ) são portos de exportação, e os portos FOR e SUA são tipicamente portos neutros, nos casos com maior número de demanda de carga. O porto de Salvador é, tipicamente, um porto de importação entre os portos considerados na região Nordeste.

A Tabela 13 apresenta a margem de contribuição e o custo total para demanda de cargas. O custo total representa aproximadamente 7% da margem de contribuição líquida. O percentual de custos por margem de contribuição líquida é 8,7%. Estes custos são referentes às atividades de embarque e desembarque de contêineres durante o reposicionamento de vazios e o transbordo de cheios, bem como os custos de penalidades oriundos da realocação de carga em rotas alternativas de modo a evitar a rejeição de carga.

Demanda de carga	Margem de Contribuição (\$)				Custo total	% Custo / Líquido
	Total Bruta	Aceita	Rejeitada	Líquido Aceito		
400	14.951.923	14.507.056	444.867	13.279.806	1.227.250	9,5%
600	22.943.722	22.065.709	878.012	20.320.162	1.745.547	8,8%
800	30.562.403	28.398.067	2.164.336	26.217.282	2.180.784	8,4%
1000	38.251.721	32.776.822	5.474.899	30.363.858	2.412.963	8,0%
1200	45.844.541	36.734.813	9.109.728	33.940.840	2.793.974	8,2%
1400	53.896.377	41.391.672	12.504.705	37.856.822	3.534.850	9,3%
Total	34.408.448	29.312.357	5.096.091	26.996.462	2.315.895	8,7%

Tabela 13 – Custos e margem de contribuição líquida para demanda de cargas e contêineres.

5.2.3 Detalhamento de uma instância

De modo a explicitar a flexibilidade do modelo no apoio à decisão para o planejamento de transporte de contêineres no nível operacional por companhias de navegação, o detalhamento da instância ‘C1000_E15_S456’ é realizado. Nesta instância, são definidas 1000 cargas para serem transportadas, o que equivale a 43.318 contêineres em dois meses de horizonte de planejamento. Para a geração das cargas, nessa instância, foi utilizada a semente 456.

Existem 5.727 TEUs de contêineres vazios como estoque inicial distribuídos nos portos no período inicial e 5.059 TEUs de contêineres cheios previamente embarcados nos navios a serem desembarcados durante o horizonte de planejamento em análise. Desse modo, existem 10.786 TEUs de contêineres disponíveis no sistema para transportar as cargas. São 1.708 contêineres de 20 pés e 4.539 contêineres de 40 pés. Conforme dados de entrada com relação à demanda cargas e a quantidade de contêineres no sistema, há uma razão de 4 contêineres no sistema para cada contêiner cheio para ser transportado demandado pelos embarcadores.

A aplicação da formulação proposta para essa instância resulta em 179 cargas rejeitadas (17,9%), equivalente a 17.361 TEUs e \$6.667.220 de margem de contribuição bruta. Foram realocadas 155 cargas (15,5%) para rotas alternativas ao atribuir-se um custo de penalidade, de modo a evitar a rejeição de cargas.

Também são considerados os custos de transbordo. Todos esses custos já são conhecidos e previamente calculados para cada caminho de rota. Então, existem 666 (66,6%) de cargas aceitas em rotas preferenciais, sem aplicação de penalidades. No total, 82,1% da demanda de carga foi aceita para o transporte.

A Tabela 14 apresenta o número de cargas rejeitadas por cada combinação de região de origem e destino. O porto MAO apresentou maior número de rejeições para destino em portos do Sul, representando 50% de todas as rejeições de cargas da instância em análise.

Inversamente, cargas de exportação de portos do Sudeste e do Sul para Manaus representam 20% de todas as cargas rejeitadas. É observado que 90,5% de todas as cargas rejeitadas possui como origem ou destino o porto MAO; somente 7% das cargas rejeitadas são transportadas dos portos do Sudeste e do Sul.

		Destino			
		Norte	Nordeste	Sudeste	Sul
Origem	Norte	0	18	18	90
	Nordeste	0	0	0	3
	Sudeste	22	1	0	13
	Sul	14	0	0	0

Tabela 14 – Quantidade de cargas rejeitadas de acordo com as regiões de origem e destino

De acordo com a Tabela 145, 92 cargas aceitas com origem ou destino em portos do Sul são realocadas em rotas alternativas para evitar a rejeição, representando 59,3% de todas as cargas realocadas.

Considerando os portos do Nordeste, 89 cargas (57,4% de todas as cargas realocadas) são importadas ou exportadas nos portos do Nordeste. Cargas realocadas quando importando ou exportando do porto MAO correspondem a 40,6% do total realocado.

		Destino			
		Norte	Nordeste	Sudeste	Sul
Origem	Norte	0	5	5	19
	Nordeste	5	0	13	15
	Sudeste	13	22	0	7
	Sul	16	29	6	0

Tabela 15 – Quantidade de cargas realocadas em rotas alternativas por regiões de origem e de destino

As utilizações da capacidade dos navios, em TEUs, são apresentadas na Figura 30 a Figura 32, mostrando a variação ao longo do ciclo de serviço para cada navio. Percebe-se uma alta utilização, em TEUs, no Serviço A (ANAV1..ANAV5) na Figura 30, e uma baixa utilização no Serviço B (BNAV1..BNAV2) na Figura 31.

No serviço A existe uma falta de capacidade ao longo do ciclo. Na Figura 31, é verificada a existência de trechos em que o navio não utiliza sua capacidade, estando vazio, ou seja, sem contêineres embarcados.

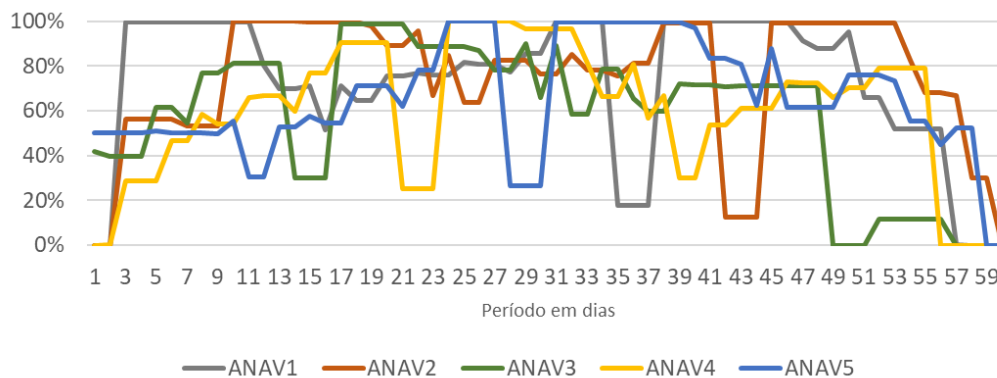


Figura 30 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço A

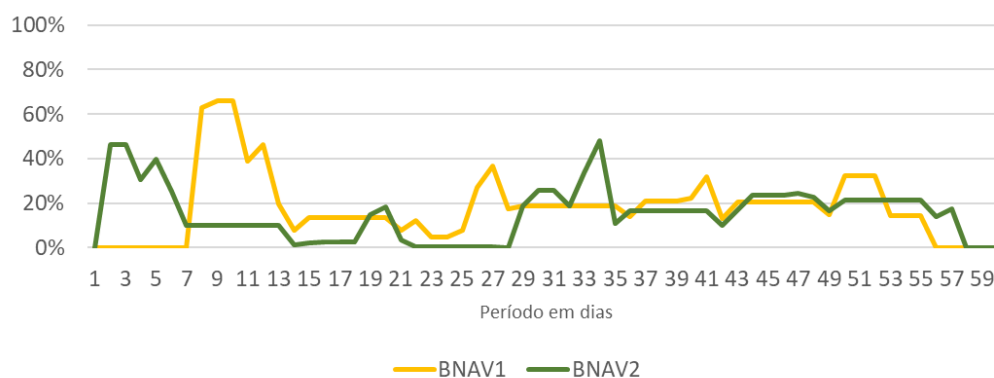


Figura 31 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço B

A Figura 32 traz a utilização dos navios em capacidade de transporte em TEUs para o Serviço C. Os navios sempre possuem contêineres a bordo com uma média de utilização entre 40% e 60%. A capacidade praticamente é sempre utilizada sem apresentar falta de capacidade ao longo dos ciclos.

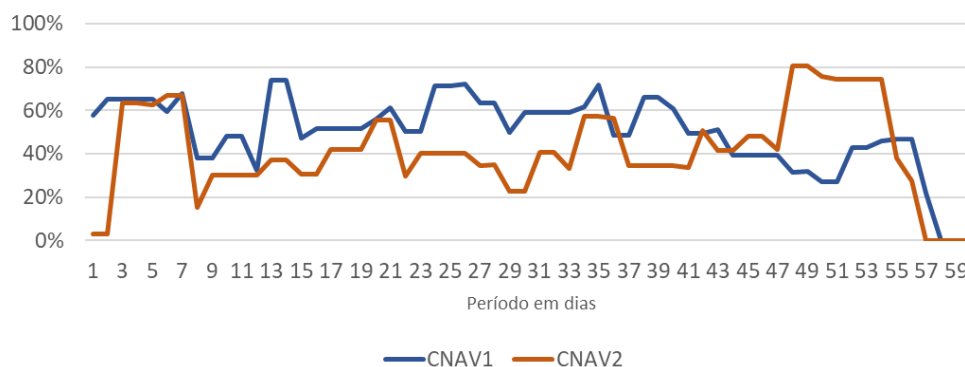


Figura 32 – Utilização dos navios da capacidade em TEUs para Serviço C

A Figura 33, Figura 34 e Figura 35 ilustram a utilização, em peso, da capacidade dos navios ao longo do horizonte de planejamento. A utilização do peso é semelhante à utilização em TEUs para o Serviço A, conforme Figura 33, e também semelhante para o serviço B, conforme a Figura 35.

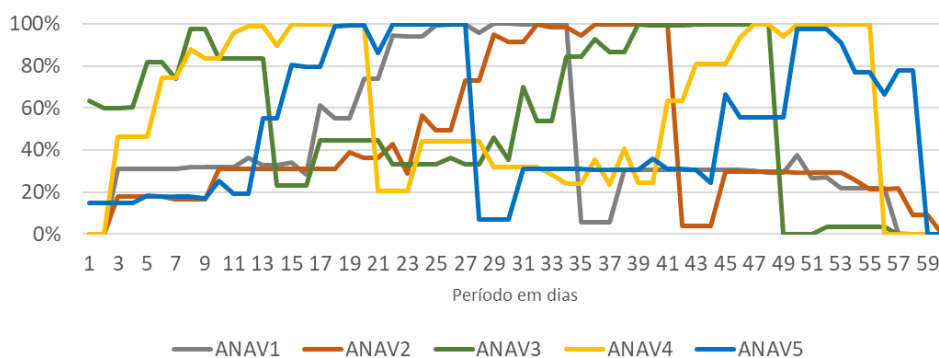


Figura 33 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço A

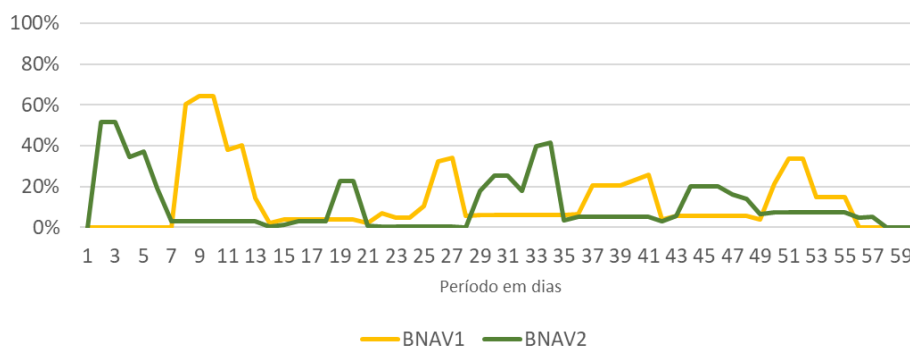


Figura 34 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço B

Diferentemente, o serviço C, conforme Figura 35, está transportando, em média, contêineres de maior peso, limitando a sua capacidade em peso, em vez de restringir por TEUs.

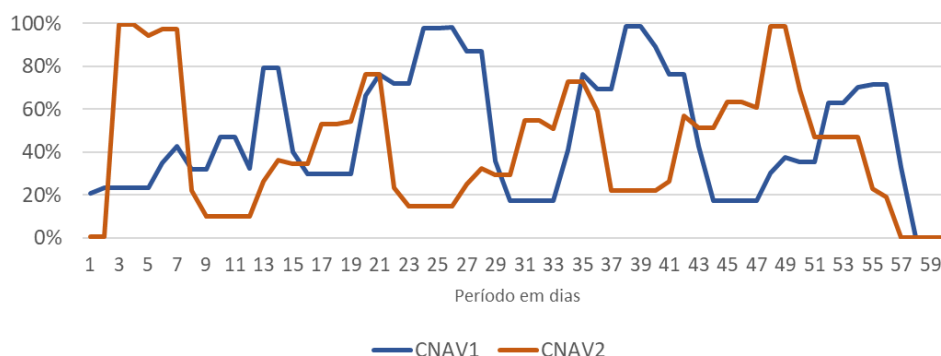


Figura 35 – Utilização dos navios da capacidade em peso para Serviço C

A Figura 36 ilustra a média e o pico de utilização da capacidade em TEUs dos navios, enquanto que a Figura 37 ilustra esses indicadores para a capacidade em peso. Os navios ANAV1 até ANAV5, do Serviço A, possuem, em média, maior utilização em relação aos demais serviços. O Serviço B, composto pelos navios BNAV1 e BNAV2, possui menor utilização média. Os navios CNAV1 e CNAV2, do serviço C, possuem uma utilização média alta.

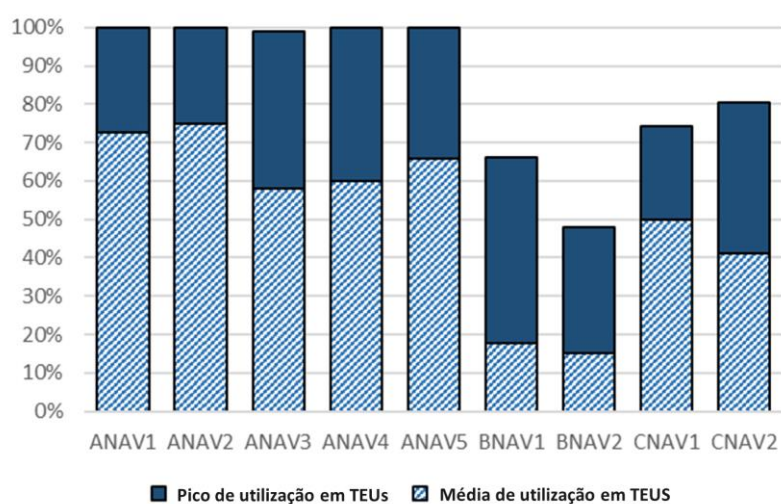


Figura 36 – Média e pico de utilização da capacidade em TEUs dos navios

O pico de utilização dos navios do Serviço A (ANAV1..ANAV5) é de 100% da capacidade em TEUs e em peso, incluindo o navio CNAV2 do serviço C com 100% de utilização da capacidade em peso. O navio CNAV1 também possui também um elevado índice de utilização em peso.

O pico de utilização da capacidade em TEUs do Serviço B (BNAV1..BNAV2) e Serviço C (CNAV1..CNAV2) variam de 48% a 80%, enquanto que o pico de utilização da capacidade em peso do Serviço B varia de 52% a 64%. A utilização global de TEUs, considerando todos os navios em conjunto, é de 54% e, para utilização global em peso, de 42%. É observada uma demanda potencial nos portos do sudeste com origem nos portos do nordeste utilizando o Serviço B, com base nas interconexões dos portos SSZ e RIO com SSA, SUA e FOR.

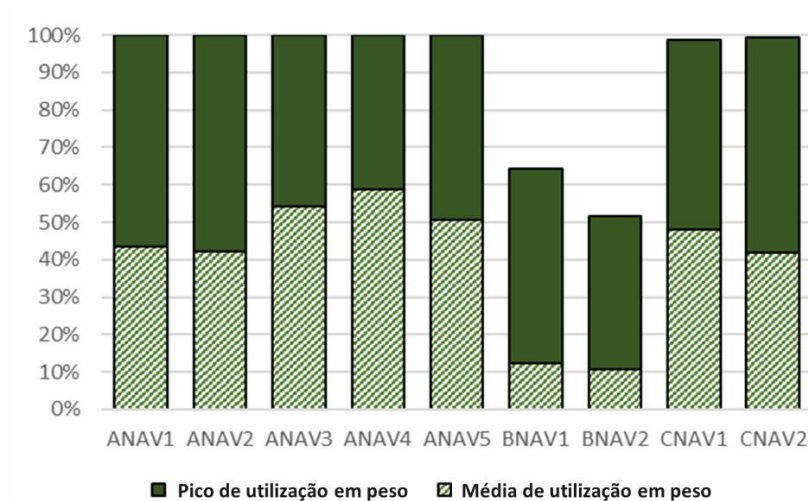


Figura 37 – Média e pico de utilização da capacidade em peso dos navios

A Figura 38 ilustra os níveis de estoque de contêineres nos portos por período agrupados por região. O eixo horizontal representa os períodos e o eixo vertical representa o número de contêineres, em TEUs. As linhas de referência representam o mínimo de estoque final requerido nos portos. O porto MAO representa 33% da demanda, apresentando um elevado nível de estoque inicial em comparação com outros portos. Entretanto, existe alguns pontos de falta de estoque ao longo do horizonte de planejamento para todos os tipos de contêineres considerados.

A Figura 39 representa a razão de exportação/importação de contêineres, em TEUs, para cada porto, de acordo com a instância em análise. Valores negativos da razão ajustada representa exportação superior à importação de contêineres. O porto MAO e os portos do Sudeste exportam mais que importam, enquanto os portos do Sudeste apresentam altos níveis de importação, incluindo porto SSA localizado na região Nordeste. Os portos FOR e SUA são portos considerados neutros, ou seja, os níveis de importação e exportação de contêineres são equivalentes em termos de TEUs ao longo do horizonte de planejamento.

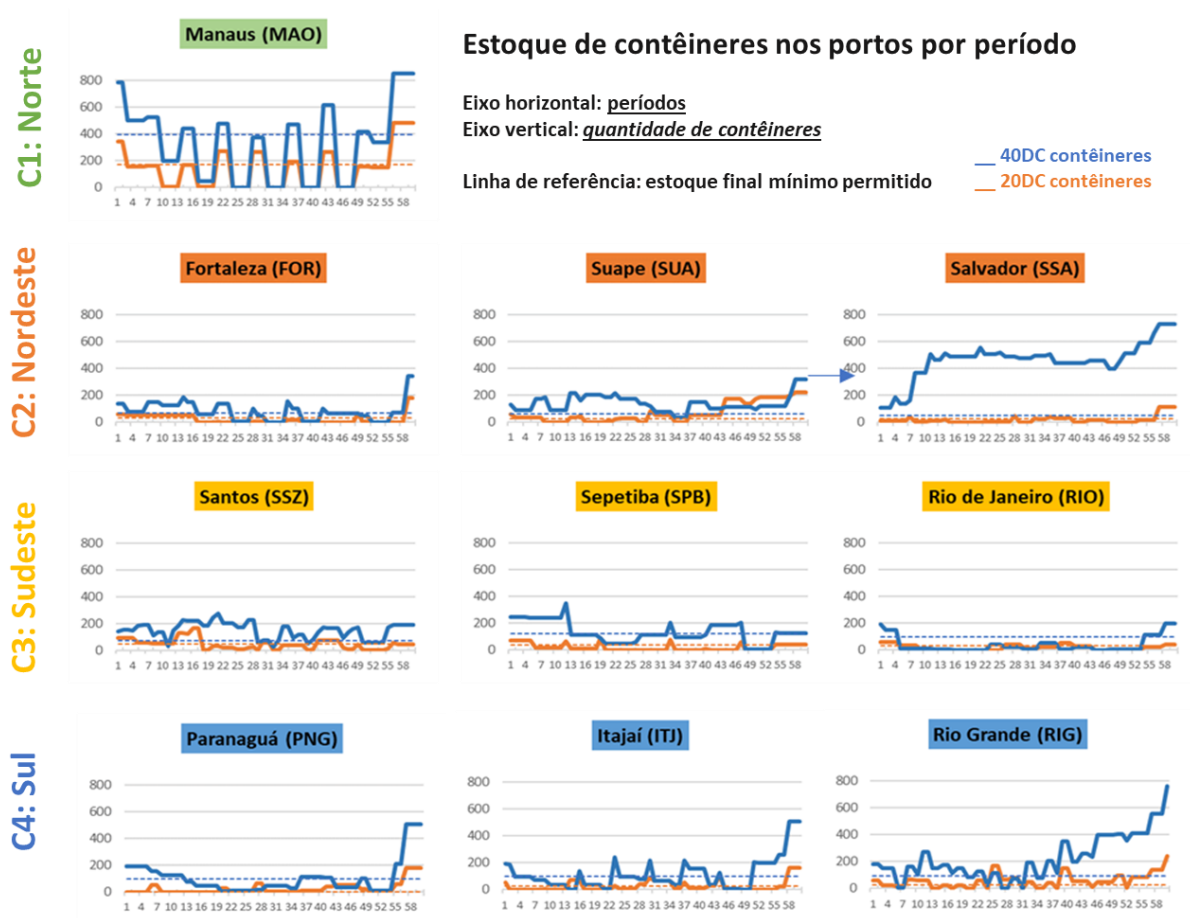


Figura 38 – Estoque de contêineres nos portos por período.

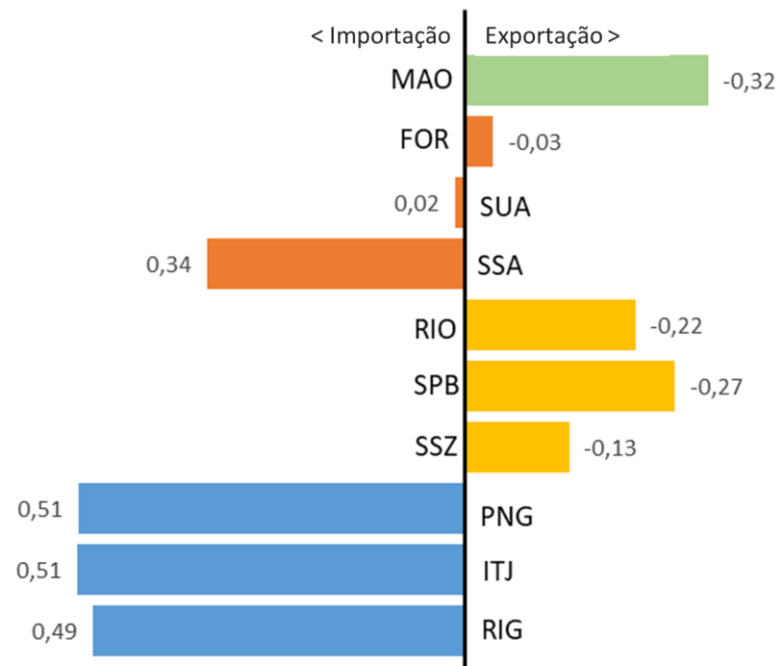


Figura 39 – Razão de exportação/importação de contêineres em cada porto.

Para esta instância, como melhor solução encontrada, foram reposicionados 648 contêineres, representando 6% dos contêineres no sistema (vazios e cheios). Considerando que as decisões deste modelo são integradas, é esperado que o número de reposicionamentos seja reduzido no caso de aumento do número de cargas para o transporte na rede de serviços. A Tabela 16 apresenta a composição da margem de contribuição líquida da instância em análise.

::: Margem de contribuição bruta total (todas cargas)	\$ 37.624.126	100%	(+)
::: Margem de contribuição perdida com a rejeição	\$ 6.667.220	17,7%	(-)
Margem de contribuição das cargas aceitas	\$ 30.956.906	82,3%	(=)
::: Custos operacionais considerados	\$ 2.292.404	6.10%	(-)
Margem de contribuição líquida (função objetivo)	\$ 28.664.502	76,2%	(=)

Tabela 16 – Composição da margem de contribuição líquida (função objetivo).

5.2.4 Desempenho computacional do modelo

Diferentes parâmetros e valores foram testados para o pacote de otimização Gurobi de modo a melhorar o processo de otimização. Foram considerados valores padrão para todos os parâmetros, exceto os parâmetros listados no Quadro 14. Foi definido também um critério de parada para o algoritmo Gurobi: cada rodada é interrompida após 18 mil segundos ou 1 milhão de nós visitados durante a execução do algoritmo B&C. Adicionalmente, no caso do percentual de GAP ser inferior a 0,1% e o tempo gasto desde a última melhor solução encontrada superior a 3.6 mil segundos, a execução é interrompida e os resultados coletados.

Nome do parâmetro no Gurobi	Nome técnico no Gurobi	Valor padrão	Valor utilizado
Number of CPU threads	Threads	0 (automático)	8
Pre-solve aggregation fill level	AggFill	-1 (automático)	10
Pre-solve sparsify reduction	PreSparsify	-1 (automático)	0
MIP solver focus	MipFocus	0 (automático)	2
Global cut control	Cuts	-1 (automático)	2
Gomory cut passes	GomoryPasses	-1 (MAXINT)	5

Quadro 14 – Parâmetros alterados após a função *tune* no pacote Gurobi

Em 85% das instâncias consideradas, a melhor solução foi encontrada em tempos computacionais reduzidos. A maior parte do tempo da execução é dispendido para provar a condição ótima da melhor solução encontrada. A Figura 40 ilustra o percentual de GAP pelo tempo de execução para instâncias de 1.400 e 1.200 cargas de demanda.

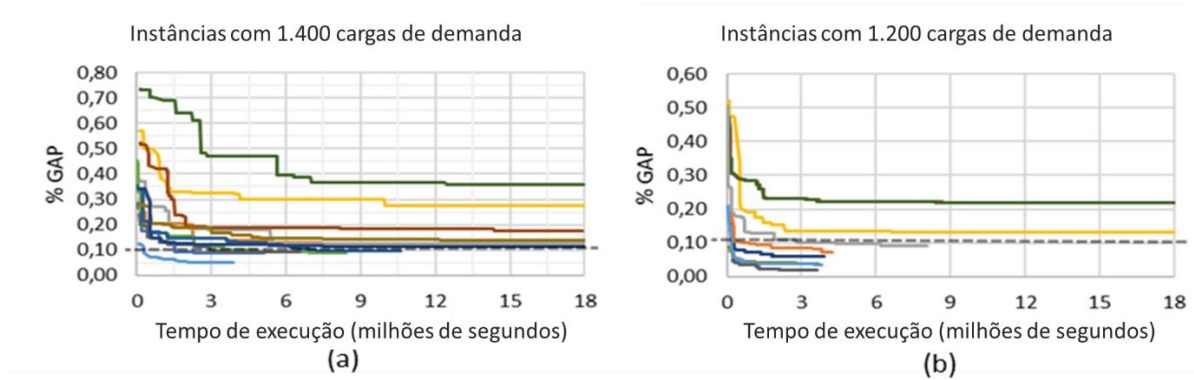


Figura 40 – Decaimento do GAP durante as interações de nós MIP até o critério de parada.

Instâncias de 600 cargas levaram menos que 3.186 segundos para encontrar a melhor solução; instâncias com 800 cargas levaram menos que 6.768 segundos com 0,03% de GAP médio até terminar pelo critério de parada. A maioria das instâncias com 1.000, 1.200 e 1.400 cargas (exceto quando $e = 15\%$, relacionado à capacidade de vazios) resultaram em 0,06% de GAP médio com 6.628 segundos de tempo de execução por instância, em média. Para 85% das instâncias consideradas na análise, a execução levou menos de 10.619 segundos de execução.

O maior conjunto de instâncias ($c = \{1.000, 1.200, 1.400\}$ cargas, $e = 15\%$ de contêineres vazios) rendeu 0,21% de GAP médio em 18.000 segundos de tempo de execução. Para este conjunto de instâncias, verificam-se mais de 39 milhões de interações e 473 milhares de nós visitados, em média. Apesar dos números apresentados serem grandes, enfatiza-se que a melhor solução foi propriamente encontrada em 85% das instâncias analisadas.

6 CONCLUSÕES

Os problemas de alocação de cargas e de reposicionamento de vazios são extremamente complexos e altamente correlacionados. A problemática se evidencia, especialmente, em decisões de nível operacional. As informações são apresentadas de forma desagregadas para as decisões de atendimento carga a carga, bem como a movimentação de cada contêiner cheio ou vazio. Um modelo de otimização que integra ambos os problemas potencializa as decisões para o aceite de cargas mais rentáveis. E para evitar a rejeição de cargas, o modelo insere uma nova discussão acerca da realocação de cargas, abrindo oportunidades de melhor nível de serviço aos embarcadores, clientes das companhias de navegação.

No modelo desenvolvido, foram utilizadas recomendações de autores pesquisados sobre as principais características de um sistema de alocação de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios. Entretanto, os modelos da literatura consideram premissas que corroboram com decisões em nível tático e estratégico, simplificando decisões típicas do nível operacional. O modelo deste estudo apresenta uma nova proposta consistente de seleção e realocação de cargas, em nível operacional. Foram incorporadas diferentes características, tais como diferentes tipos de contêineres, transbordos entre navios e janelas para atendimento, sem limites quanto ao modelo, que aumentam a sua flexibilidade do modelo. É interessante observar que é utilizada uma nova abordagem de rede espaço-tempo. É observado que esta abordagem resolve problemas de forma integrada em tempos computacionais reduzidos.

Apesar da característica combinatória do problema, os resultados obtidos em termos de performance mostraram a potencialidade do modelo em resolver problemas de grande porte. Resulta numa previsão satisfatória de datas futuras de chegadas de contêineres vazios, dos momentos em que os contêineres cheios e vazios deverão ser embarcados e por qual navio e as datas em que estes contêineres estarão disponíveis no porto de destino.

O SAD não apenas define o caminho de rota dos contêineres baseado na máxima margem de contribuição líquida, mas provê o controle de todas as movimentações dos trechos de transporte. Possui um bom nível de parametrização, oferecendo grandes possibilidades para testes e análises de cenários diversos, permitindo a avaliação de diferentes políticas de estoque inicial e final, bem como limitações que possam ocorrer em trechos na rede de serviço. A geração aleatória de cargas auxilia na obtenção de resultados para estudos de capacidades futuras com parâmetros originados de análises históricas.

Assim, o modelo atingiu o seu objetivo de propor uma sistemática válida para decisões em nível operacional dos problemas de alocação de cargas e de reposicionamento de vazios, integrado e executável, com uma verificação de sua aderência aos resultados desejados. Permite criar diversas oportunidades nas decisões entre as companhias de navegação e seus clientes. Todo o modelo foi concebido tendo como base um SAD. Este sistema permite maior flexibilidade na gestão das instâncias e do problema, de modo intuitivo, por especialistas, mesmo com restrito conhecimento em pesquisa operacional.

Por fim, esta pesquisa provou ser possível a unificação de problemas usualmente tratados na literatura de forma isolada ou integrados sem a utilização de modelo único de otimização. Cenários operacionais são considerados com restrições fortes e com informações desagregadas, levando a cenários mais realistas para o problema tratado.

Com o desenvolvimento desse novo modelo para o transporte marítimo em nível de decisão operacional, é esperado ter alcançado o avanço no conhecimento dessa área, com potencial utilização pelas companhias de navegação.

6.1 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo dessa subseção, são apresentadas limitações da pesquisa com sugestões de modo a endereçar à trabalhos futuros.

Tempo de estadia do contêiner antes e depois do transporte

Por simplificação do modelo, foi desconsiderada a necessidade de estadia de contêineres antes e depois do transporte. A estadia envolve todo o procedimento de tornar o contêiner vazio em cheio, bem como o contrário.

Futuramente, é possível explorar e incorporar esse tipo de restrição que ainda não foi observada na literatura para o problema integrado. Este tipo de incorporação aumenta o tempo computacional e a complexidade das instâncias, bem como reduz a disponibilidade de vazios. Mas, essa condição permite aproximar o modelo de um cenário operacional mais realista.

Operações de *leasing* de contêineres

Não foram consideradas operações de *leasing* de contêineres. A proposta de modelo integrado já permite uma maior disponibilidade de vazios no sistema reduzindo a necessidade

de *leasing* para atendimento das cargas. A rede de serviços do modelo considera um sistema estritamente fechado, havendo a possibilidade de, indiretamente, considerar demandas e ofertas fixas no modelo ao longo do horizonte de planejamento. Isso permite análises específicas de relações com sistemas externos, tal como para representar possíveis decisões de *leasing*.

Ainda de modo a permitir maior flexibilidade e aplicabilidade do modelo em outros cenários, inclusive no estudo da capacidade de vazios, é sugerida a adoção de decisões de *leasing* em conjunto com as decisões já incorporadas no modelo.

Contêineres de propriedade do embarcador

Não foram considerados no modelo contêineres de propriedade do embarcador. É observado no mercado que esse tipo de demanda não é significativo para incorporação no modelo. Apesar disso, essa característica de demanda no modelo tende a tornar o problema menos restritivo. Isso é possível dado que o fluxo de contêineres vazios para decisões de transporte de contêineres do embarcador não depende de disponibilidade de vazios pela companhia de navegação.

Entretanto, havendo necessidade de considerar alguma limitação do navio em determinado trecho por conta de transporte de contêineres de embarcadores, o modelo permite a inclusão desse tipo de restrição facilmente. Assim, de modo simplificado, é possível considerar restrições de capacidade para demandas já confirmadas cujo contêineres são dos embarcadores. Também, como sugestão, é possível a incorporação dessa característica de demanda para as decisões do modelo.

Outros tipos de rede de serviços

Os cenários de teste do modelo são limitados a resolver instâncias com rede de serviços cuja topologia é configurada de modo tradicional, comum no contexto brasileiro de cabotagem. Esta limitação foi definida em virtude do escopo da pesquisa que foi restringida à cabotagem na costa brasileira para a validação do modelo.

De qualquer forma, é possível aplicar este modelo em outros tipos de rede de serviço como, por exemplo, *hub-and-spoke* ou híbridos. A flexibilidade presente na modelagem matemática baseada numa rede espaço-tempo permite considerar diferentes topologias. Não somente é possível analisar decisões em cenários operacionais, mas também analisar decisões em cenários estratégicos e táticos.

Cenários realistas de companhias de navegação

A validação do modelo partiu de dados hipotéticos condizentes com a realidade de uma companhia de navegação que opera cabotagem na costa brasileira. Entretanto, todos os cenários hipotéticos foram criados buscando uma ampla aproximação da realidade, por meio de observações e dados disponíveis. De qualquer forma, a utilização de cenários hipotéticos, que traz suas limitações, também permite diversas possibilidades de testes de flexibilidade e aplicabilidade.

Mesmo assim, é um ponto considerável utilizar o modelo proposto em cenários aplicados na realidade de uma ou mais companhias de navegação, de modo a comparar os resultados do modelo com o resultado operacional. É possível evidenciar, efetivamente, testar a qualidade do modelo no apoio em decisões de nível operacional por companhias de navegação.

A pesquisa produziu avanço significativo na modelagem de problema de alocação de cargas e reposicionamento de vazios no nível operacional, com uma abordagem inovadora utilizando rede espaço-tempo. Não obstante, esse campo continua promissor para aperfeiçoamentos e novas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, R., & ERGUN, O. (2008). Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. *Transportation Science*, 42(2), 175–196. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0205>
- AGERSCHOU, H. (1983). *Planning and design of ports and maritime structures*. Wiley.
- BANDEIRA, D. L., BECKER, J. L., & BORENSTEIN, D. (2009). A DSS for integrated distribution of empty and full containers. *Decision Support Systems*, 47(4), 383–397. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.04.003>
- BARTODZIEJ, P., & DERIGS, U. (2004). *Experimental and Efficient Algorithms*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- BELLI, M. G. H., LIU, X., RIOULT, J., & AMGELOUDIS, P. (2013). A cost-based maritime container assignment model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 58, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.09.006>
- BRANCHINI, R. M., ARMENTANO, V. A., & MORABITO, R. (2015). Routing and fleet deployment in liner shipping with spot voyages. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 57, 188–205. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.009>
- BROUER, B. D., DESAULNIERS, G., & PISINGER, D. (2014). A matheuristic for the liner shipping network design problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 42–59. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.012>
- BROUER, B. D., PISINGER, D., & SPOORENDONK, S. (2011). Liner Shipping Cargo Allocation with Repositioning of Empty Containers. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 49(2).
- CARLO, H. J., VIS, I. F. A., & ROODBERGEN, K. J. (2014). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, 236(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.023>
- CHANG, C., LAN, L. W., & LEE, M. (2015). An integrated container management model for optimizing slot allocation plan and empty container repositioning. *Maritime Economics & Logistics*, 17(3), 315–340. <https://doi.org/10.1057/mel.2014.23>

- CHOONG, S. T., COLE, M. H., & KUTANOGLU, E. (2002). Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(6), 423–438. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(02\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00018-2)
- CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K., NYGREEN, B., & RONEN, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228(3), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.002>
- CRAINIC, T. G., DEJAX, P. J., & DELORNE, L. (1989). Models for multimode multicommodity location problems with interdepot balancing requirements. *Annals of Operations Research*, 18(1), 277–302.
- CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., & DEJAX, P. (1993). Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. *Operations Research*, 41(1), 102–126.
- CRAINIC, T. G., & KIM, K. H. (2005). Intermodal Transportation. *Technology Teacher*, 64(November), 15–18. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6)
- CULLINANE, K., & KHANNA, M. (1999). Economies of Scale in Large Container Ships
Economies of Scale in Large Container Ships Kevin Cullinane and Mahim Khanna *, 33(2), 185–207.
- CULLINANE, K., & KHANNA, M. (2000). Economies of scale in large containerships: Optimal size and geographical implications. *Journal of Transport Geography*, 8(3), 181–195. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(00\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(00)00010-7)
- CUOCO, M. (2008). *Otimização da seleção e alocação de cargas em navios de contêineres*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- DONG, J.-X., & SONG, D.-P. (2009). Container fleet sizing and empty repositioning in liner shipping systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 860–877. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.05.001>
- FAGERHOLT, K., GAUSEL, N. T., RAKKE, J. G., & PSARAFTIS, H. N. (2015). Maritime routing and speed optimization with emission control areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.010>
- GERHARDT, T. E., & SILVEIRA, D. T. (2009). *Métodos de Pesquisa*. (Editora UFRGS, Ed.). Porto Alegre.

- GIL, A. C. (2010). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (Atlas, Ed.) (5th ed.). São Paulo.
- GÜNER-ÖZBEK, M. D. (2008). *The Carriage of Dangerous Goods by Sea* (12th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gurobi, O. I. (2013). *Gurobi optimizer reference manual*. Retrieved from <http://www.gurobi.com>
- HALFF, A. (2017). *Slow Steaming to 2020 : Innovation and Inertia in Marine Transport and Fuels*. New York.
- HINKELMAN, E. G. (2012). *Dictionary of International Trade: Handbook of the Global Trade Community* (10th ed.). World Trade Pr.
- IMAI, A., SHINTANI, K., & PAPADIMITRIOU, S. (2009). Multi-port vs. Hub-and-Spoke port calls by containerships. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5), 740–757. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.01.002>
- KARSTEN, C. V., PISINGER, D., ROPKE, S., & BROUER, B. D. (2015). The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, 122–138. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.005>
- LI, J. A., LEUNG, S. C. H., WU, Y., & LIU, K. (2007). Allocation of empty containers between multi-ports. *European Journal of Operational Research*, 182(1), 400–412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.003>
- LI, J. A., LIU, K., LEUNG, S. C. H., & LAI, K. K. (2004). Empty container management in a port with long-run average criterion. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(1–2), 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2003.12.005>
- LORANGE, P. (2009). *Shipping Strategy: Innovating for Success*. New York: Cambridge University Press.
- MENG, Q., & WANG, S. (2011). Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5), 695–708. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.02.004>
- NORSTAD, I., FAGERHOLT, K., & LAPORTE, G. (2011). Tramp ship routing and

- scheduling with speed optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 853–865. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.05.001>
- NOTEBOOM, T. E. (2001). *Spatial and functional integration of container port systems and hinterland networks in Europe*.
- ORDEN, A. (1956). The Transshipment Problem. *Management Science*, 276–285.
- PSARAFTIS, H. N., & KONTOVAS, C. A. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 44, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001>
- RONEN, D. (1983). Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. *European Journal of Operational Research*, 12(2), 119–126. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90215-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90215-1)
- SHINTANIA, K., IMAIB, A., NISHIMURAB, E., & PAPADIMITRIOUC, S. (2007). The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(1), 39–59.
- SIMPSON, R. W. (1969). *Scheduling and routing models for airline systems*.
- SONG, D.-P., & DONG, J.-X. (2012). Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), 1556–1575. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>
- SONG, D., ZHANGA, J., CARTENA, J., FIELDDB, T., MARSHALLA, J., Polakc, J., ... WOODSA, J. (2005). On cost-efficiency of the global container shipping network. *Maritime Policy & Management*, 32(1), 15–30.
- TEIXEIRA, R. B. (2011). *Modelo integrado para seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- TEIXEIRA, R. B., & CUNHA, C. B. (2012). Modelo integrado para seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo. *Revista Transportes*, 1, 59–70.
- TRAN, N. K., & HAASIS, H.-D. (2015). Literature survey of network optimization in container

- liner shipping. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 139–179.
<https://doi.org/10.1007/s10696-013-9179-2>
- UNCTAD. (2016). *Review of Maritime Transport*.
- UNITED, N. (2005). *Free Trade Zone and Port Hinterland Development*. United Nations Publications.
- VIS, I. F. A., & KOSTER, R. de. (2003). Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 1–16.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00293-X)
- VON WESTARP, A. G., & SCHINAS, O. (2016). A fuzzy approach for container positioning considering sustainable profit optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 92, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.014>
- WANG, H., WANG, S., & MENG, Q. (2014). Simultaneous optimization of schedule coordination and cargo allocation for liner container shipping networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 261–273.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.07.005>
- WANG, S., LIU, Z., & BELL, M. G. H. (2015). Profit-based maritime container assignment models for liner shipping networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 72, 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.11.006>
- WANG, Y., MENG, Q., & DU, Y. (2015). Liner container seasonal shipping revenue management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 82, 141–161.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.10.003>
- WHITE, W. W., & BOMBERAULT, A. M. (1969). A network algorithm for empty freight car allocation. *IBM Syst. Journal*, 8, 147–169.
- WINSTON, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Thomson.
- ZAMBUZI, N., & CUNHA, C. B. (2010). A decision support system for the planning of empty containers repositioning. In *Proceedings of IAME conference*. Lisbon (Portugal).

APÊNDICES

Apêndice A - Paradas dos navios nos portos para embarque e desembarque

Id	Navio	Porto	Dia
1	ANAV1	MAO	1
2	ANAV1	MAO	3
3	ANAV1	SUA	8
4	ANAV1	SPB	12
5	ANAV1	SSZ	13
6	ANAV1	SSZ	15
7	ANAV1	ITJ	16
8	ANAV1	ITJ	17
9	ANAV1	RIG	18
10	ANAV1	RIG	20
11	ANAV1	PNG	22
12	ANAV1	SSZ	23
13	ANAV1	SSZ	25
14	ANAV1	RIO	26
15	ANAV1	SSA	28
16	ANAV1	SSA	29
17	ANAV1	FOR	31
18	ANAV1	MAO	35
19	ANAV1	MAO	38
20	ANAV1	SUA	43
21	ANAV1	SPB	47
22	ANAV1	SSZ	48
23	ANAV1	SSZ	50
24	ANAV1	ITJ	51
25	ANAV1	ITJ	52
26	ANAV1	RIG	53
27	ANAV1	RIG	55
28	ANAV1	PNG	57
29	ANAV1	SSZ	58
30	ANAV1	SSZ	60
31	ANAV2	FOR	3
32	ANAV2	MAO	7
33	ANAV2	MAO	10
34	ANAV2	SUA	15
35	ANAV2	SPB	19
36	ANAV2	SSZ	20
37	ANAV2	SSZ	22
38	ANAV2	ITJ	23
39	ANAV2	ITJ	24
40	ANAV2	RIG	25
41	ANAV2	RIG	27
42	ANAV2	PNG	29
43	ANAV2	SSZ	30
44	ANAV2	SSZ	32
45	ANAV2	RIO	33
46	ANAV2	SSA	35
47	ANAV2	SSA	36

Id	Navio	Porto	Dia
95	ANAV4	FOR	17
96	ANAV4	MAO	21
97	ANAV4	MAO	24
98	ANAV4	SUA	29
99	ANAV4	SPB	33
100	ANAV4	SSZ	34
101	ANAV4	SSZ	36
102	ANAV4	ITJ	37
103	ANAV4	ITJ	38
104	ANAV4	RIG	39
105	ANAV4	RIG	41
106	ANAV4	PNG	43
107	ANAV4	SSZ	44
108	ANAV4	SSZ	46
109	ANAV4	RIO	47
110	ANAV4	SSA	49
111	ANAV4	SSA	50
112	ANAV4	FOR	52
113	ANAV4	MAO	56
114	ANAV4	MAO	59
115	ANAV5	SUA	1
116	ANAV5	SPB	5
117	ANAV5	SSZ	6
118	ANAV5	SSZ	8
119	ANAV5	ITJ	9
120	ANAV5	ITJ	10
121	ANAV5	RIG	11
122	ANAV5	RIG	13
123	ANAV5	PNG	15
124	ANAV5	SSZ	16
125	ANAV5	SSZ	18
126	ANAV5	RIO	19
127	ANAV5	SSA	21
128	ANAV5	SSA	22
129	ANAV5	FOR	24
130	ANAV5	MAO	28
131	ANAV5	MAO	31
132	ANAV5	SUA	36
133	ANAV5	SPB	40
134	ANAV5	SSZ	41
135	ANAV5	SSZ	43
136	ANAV5	ITJ	44
137	ANAV5	ITJ	45
138	ANAV5	RIG	46
139	ANAV5	RIG	48
140	ANAV5	PNG	50
141	ANAV5	SSZ	51

Id	Navio	Porto	Dia
189	BNAV2	SSA	19
190	BNAV2	SUA	20
191	BNAV2	FOR	21
192	BNAV2	FOR	22
193	BNAV2	SSZ	28
194	BNAV2	SSZ	29
195	BNAV2	RIO	30
196	BNAV2	SSA	32
197	BNAV2	SSA	33
198	BNAV2	SUA	34
199	BNAV2	FOR	35
200	BNAV2	FOR	36
201	BNAV2	SSZ	42
202	BNAV2	SSZ	43
203	BNAV2	RIO	44
204	BNAV2	SSA	46
205	BNAV2	SSA	47
206	BNAV2	SUA	48
207	BNAV2	FOR	49
208	BNAV2	FOR	50
209	BNAV2	SSZ	56
210	BNAV2	SSZ	57
211	BNAV2	RIO	58
212	BNAV2	SSA	60
213	BNAV2	SSA	61
214	CNAV1	SSA	1
215	CNAV1	SUA	2
216	CNAV1	PNG	6
217	CNAV1	ITJ	7
218	CNAV1	RIG	8
219	CNAV1	RIG	10
220	CNAV1	SSZ	12
221	CNAV1	SPB	13
222	CNAV1	SSA	15
223	CNAV1	SUA	16
224	CNAV1	PNG	20
225	CNAV1	ITJ	21
226	CNAV1	RIG	22
227	CNAV1	RIG	24
228	CNAV1	SSZ	26
229	CNAV1	SPB	27
230	CNAV1	SSA	29
231	CNAV1	SUA	30
232	CNAV1	PNG	34
233	CNAV1	ITJ	35
234	CNAV1	RIG	36
235	CNAV1	RIG	38

Id	Navio	Porto	Dia
48	ANAV2	FOR	38
49	ANAV2	MAO	42
50	ANAV2	MAO	45
51	ANAV2	SUA	50
52	ANAV2	SPB	54
53	ANAV2	SSZ	55
54	ANAV2	SSZ	57
55	ANAV2	ITJ	58
56	ANAV2	ITJ	59
57	ANAV2	RIG	60
58	ANAV3	PNG	1
59	ANAV3	SSZ	2
60	ANAV3	SSZ	4
61	ANAV3	RIO	5
62	ANAV3	SSA	7
63	ANAV3	SSA	8
64	ANAV3	FOR	10
65	ANAV3	MAO	14
66	ANAV3	MAO	17
67	ANAV3	SUA	22
68	ANAV3	SPB	26
69	ANAV3	SSZ	27
70	ANAV3	SSZ	29
71	ANAV3	ITJ	30
72	ANAV3	ITJ	31
73	ANAV3	RIG	32
74	ANAV3	RIG	34
75	ANAV3	PNG	36
76	ANAV3	SSZ	37
77	ANAV3	SSZ	39
78	ANAV3	RIO	40
79	ANAV3	SSA	42
80	ANAV3	SSA	43
81	ANAV3	FOR	45
82	ANAV3	MAO	49
83	ANAV3	MAO	52
84	ANAV3	SUA	57
85	ANAV4	ITJ	2
86	ANAV4	ITJ	3
87	ANAV4	RIG	4
88	ANAV4	RIG	6
89	ANAV4	PNG	8
90	ANAV4	SSZ	9
91	ANAV4	SSZ	11
92	ANAV4	RIO	12
93	ANAV4	SSA	14
94	ANAV4	SSA	15

Id	Navio	Porto	Dia
142	ANAV5	SSZ	53
143	ANAV5	RIO	54
144	ANAV5	SSA	56
145	ANAV5	SSA	57
146	ANAV5	FOR	59
147	BNAV1	SSZ	7
148	BNAV1	SSZ	8
149	BNAV1	RIO	9
150	BNAV1	SSA	11
151	BNAV1	SSA	12
152	BNAV1	SUA	13
153	BNAV1	FOR	14
154	BNAV1	FOR	15
155	BNAV1	SSZ	21
156	BNAV1	SSZ	22
157	BNAV1	RIO	23
158	BNAV1	SSA	25
159	BNAV1	SSA	26
160	BNAV1	SUA	27
161	BNAV1	FOR	28
162	BNAV1	FOR	29
163	BNAV1	SSZ	35
164	BNAV1	SSZ	36
165	BNAV1	RIO	37
166	BNAV1	SSA	39
167	BNAV1	SSA	40
168	BNAV1	SUA	41
169	BNAV1	FOR	42
170	BNAV1	FOR	43
171	BNAV1	SSZ	49
172	BNAV1	SSZ	50
173	BNAV1	RIO	51
174	BNAV1	SSA	53
175	BNAV1	SSA	54
176	BNAV1	SUA	55
177	BNAV1	FOR	56
178	BNAV1	FOR	57
179	BNAV2	RIO	2
180	BNAV2	SSA	4
181	BNAV2	SSA	5
182	BNAV2	SUA	6
183	BNAV2	FOR	7
184	BNAV2	FOR	8
185	BNAV2	SSZ	14
186	BNAV2	SSZ	15
187	BNAV2	RIO	16
188	BNAV2	SSA	18

Id	Navio	Porto	Dia
236	CNAV1	SSZ	40
237	CNAV1	SPB	41
238	CNAV1	SSA	43
239	CNAV1	SUA	44
240	CNAV1	PNG	48
241	CNAV1	ITJ	49
242	CNAV1	RIG	50
243	CNAV1	RIG	52
244	CNAV1	SSZ	54
245	CNAV1	SPB	55
246	CNAV1	SSA	57
247	CNAV1	SUA	58
248	CNAV2	RIG	1
249	CNAV2	RIG	3
250	CNAV2	SSZ	5
251	CNAV2	SPB	6
252	CNAV2	SSA	8
253	CNAV2	SUA	9
254	CNAV2	PNG	13
255	CNAV2	ITJ	14
256	CNAV2	RIG	15
257	CNAV2	RIG	17
258	CNAV2	SSZ	19
259	CNAV2	SPB	20
260	CNAV2	SSA	22
261	CNAV2	SUA	23
262	CNAV2	PNG	27
263	CNAV2	ITJ	28
264	CNAV2	RIG	29
265	CNAV2	RIG	31
266	CNAV2	SSZ	33
267	CNAV2	SPB	34
268	CNAV2	SSA	36
269	CNAV2	SUA	37
270	CNAV2	PNG	41
271	CNAV2	ITJ	42
272	CNAV2	RIG	43
273	CNAV2	RIG	45
274	CNAV2	SSZ	47
275	CNAV2	SPB	48
276	CNAV2	SSA	50
277	CNAV2	SUA	51
278	CNAV2	PNG	55
279	CNAV2	ITJ	56
280	CNAV2	RIG	57
281	CNAV2	RIG	59